Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

16+
ISSN 2071-6168

ИЗВЕСТИЯ ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 10

Тула
Издательство ТулГУ
2024

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель
Кравченко О.А., д-р техн. наук.

Первый заместитель председателя
Воротилин М.С., д-р техн. наук.

Заместитель председателя
Прейс В.В., д-р техн. наук, авторизованный представитель Издательства ТулГУ в РИНЦ.

Ответственный секретарь
Моргунова Е.В., авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ.

Члены редакционного совета:

Батанина И.А., д-р полит. наук –
гл. редактор серии «Гуманитарные науки»;
Берестнев М.А., канд. юрид. наук –
гл. редактор серии «Экономические и юридические науки»;
Борискин О.И., д-р техн. наук –
гл. редактор серии «Технические науки»;
Егоров В.Н., канд. пед. наук –
гл. редактор серии «Физическая культура. Спорт»;
Заславская О.В., д-р пед. наук –
гл. редактор серии «Педагогика»;
Качурин Н.М., д-р техн. наук –
гл. редактор серии «Науки о Земле»;
Понаморева О.Н., д-р хим. наук –
гл. редактор серии «Естественные науки».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Борискин О.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).
Заместитель главного редактора
Ларин С.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Ответственный секретарь
Яковлев Б.С., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).
Авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ
Журин А.В., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Члены редакционной коллегии:

Агуреев И.Е., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Анцев А.В. д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Анцев В.Ю. д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Бабкин А.С., д-р техн. наук (ЛГТУ, г. Липецк);
Бабокин Г.И., д-р техн. наук (Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва);
Вальтер А.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Вартанов М.В., д-р техн. наук (Московский политехнический университет, г. Москва);
Васин С.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Волгин В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Гринчар Н.Г., д-р техн. наук (Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва);
Дикусар А.И., чл.-корр. АН Молдовы, д-р хим. наук (Институт прикладной физики АН Молдовы, г. Кишинев);
Добровольский Н.М., д-р физ.-мат. наук (ТГПУ, г. Тула);
Жулай В.А., д-р техн. наук (Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж);
Запомель Я., д-р техн. наук (Технический университет Остравы, Чехия, г. Острава);
Золотухин В.И., д-р техн. наук (ТулГУ, НПП «Вулкан-ТМ», г. Тула);
Крюков В.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Куц В.В.., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);
Лавриненко В.Ю., д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);
Ивахненко А.Г., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);
Колтунович Т.Н., д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, Польша, г. Люблин);
Коновалов А.В., д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва);
Костров Б.В., д-р техн. наук (Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, г. Рязань);
Ларкин Е.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Мещеряков В.Н., д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), г. Липецк);
Мозжечков В.А., д-р техн. наук (АО «Тулаэлектропривод», г. Тула);
Романович А.А. д-р техн. наук (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород);
Савин Л.А., д-р техн. наук (Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл);
Степанов В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Сычугов А.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Титов В.С., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск);
Трегубов В.И., д-р техн. наук (АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева», г. Тула);
Черняев А.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);
Шолохов М.А., д-р техн. наук (УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург);
Юдин С.В., д-р техн. наук (Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Тульский филиал, г. Тула);
Яцун С.Ф., д-р техн. наук (Юго-Западный государственный университет, г. Курск).

ISSN 2071-6168

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-75986 от 19 июня 2019 г.

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);
2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки);
2.3.5 Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки);
2.4.2 Электротехнические комплексы и системы (технические науки);
2.5.2 Машиноведение (технические науки);
2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки);
2.5.6 Технология машиностроения (технические науки);
2.5.7 Технологии и машины обработки давлением (технические науки);
2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки);
2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки);
2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки);
2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства (технические науки).

© Авторы научных статей, 2024
© Издательство ТулГУ, 2024

УДК 622.692
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-3-4

ОБЗОР НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

М.И. Гильдебрандт

Рассмотрены наиболее значимые нормативно-технические документы в области энергосбережения и выявлены основные критерии эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов.
Ключевые слова: нефтепродукты, энергосбережение, насос, загрузка нефтепровода.

Значимые вопросы энергосбережения регламентируются Российскими и международными документами [1-11]. Данные документы носят лишь рекомендательный характер и говорят о необходимости создания энергосберегающих мероприятий. Документы не содержат в себе конкретных предложений по разработке и составу данных мероприятий. Нефтепроводные предприятия и компании самостоятельно должны разрабатывать мероприятия, планы и программы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности с порядком разработки, утверждением, корректировкой и контролем исполнения.

Требования к программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности предприятия отражены в [11]. Они включают в себя:

1) Целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Обеспечение данных показателей предусматривается при реализации этих программ.

2) Обязательные мероприятия по энергосбережению и повышению энергетической эффективности, а так же сроки их проведения.

3) Показатели энергетической эффективности объектов. Их создание или изменение планируется производственными или инвестиционными программами организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности.

В документе [3] говорится о том, что предприятия должны осуществлять и документировать процесс, связанный с энергетическим планированием. Планирование должно согласовываться с энергетической политикой государства. Так же, энергетическое планирование должно вести к осуществлению действий, которые направлены на постоянное улучшение энергетических результатов деятельности нефтепроводного предприятия. Виды деятельности предприятия, которые, так или иначе, влияют на энергетические результаты, должны быть проанализированы и входить в энергетическое планирование предприятия. Так же, в документе сказано о том, что организация должна устанавливать, внедрять и иметь доступ к применимым к её деятельности законодательным и другим требованиям, которое предприятие обязалась выполнять в отношении потребления энергии и энергетической эффективности. Предприятие самостоятельно определяет, каким образом эти требования будут достигаться, а также обеспечивать учёт требований, которые предприятие обязалось выполнять при разработке системы энергетического менеджмента.

В документе [3] представлена схема (рисунок 1), которая предназначена для улучшения понимания процесса энергетического планирования предприятия.

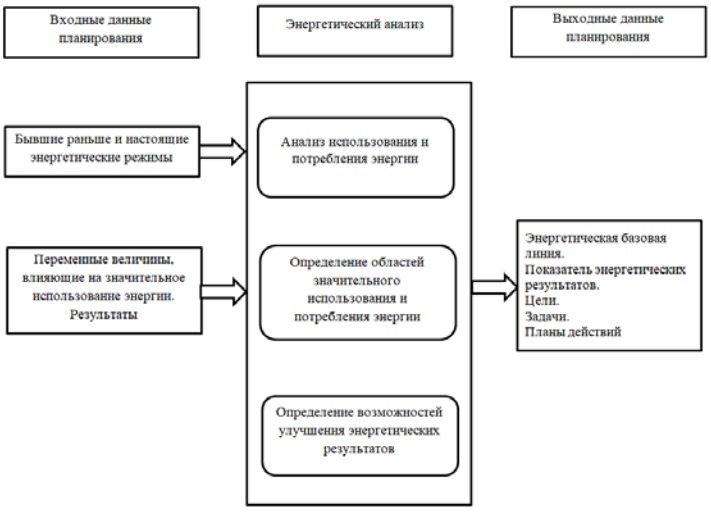


Рис. 1. Схема энергетического планирования предприятия

Данная схема отображает основные моменты планирования потребления энергии промышленного предприятия. Блоки, показанные на схеме, не является исчерпывающими, они могут быть дополнены другими элементами, характерными для конкретного предприятия. Под понятием энергетической эффективности, исходя из [11], понимается характеристика, которая отражает отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов. А энергосбережение это есть реализация организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования.

На основании Федерального закона об энергосбережении [11] были выделены основные показатели энергоэффективности. В соответствии с [2, 4] существует следующая классификация показателей энергетической эффективности (рисунок 2).

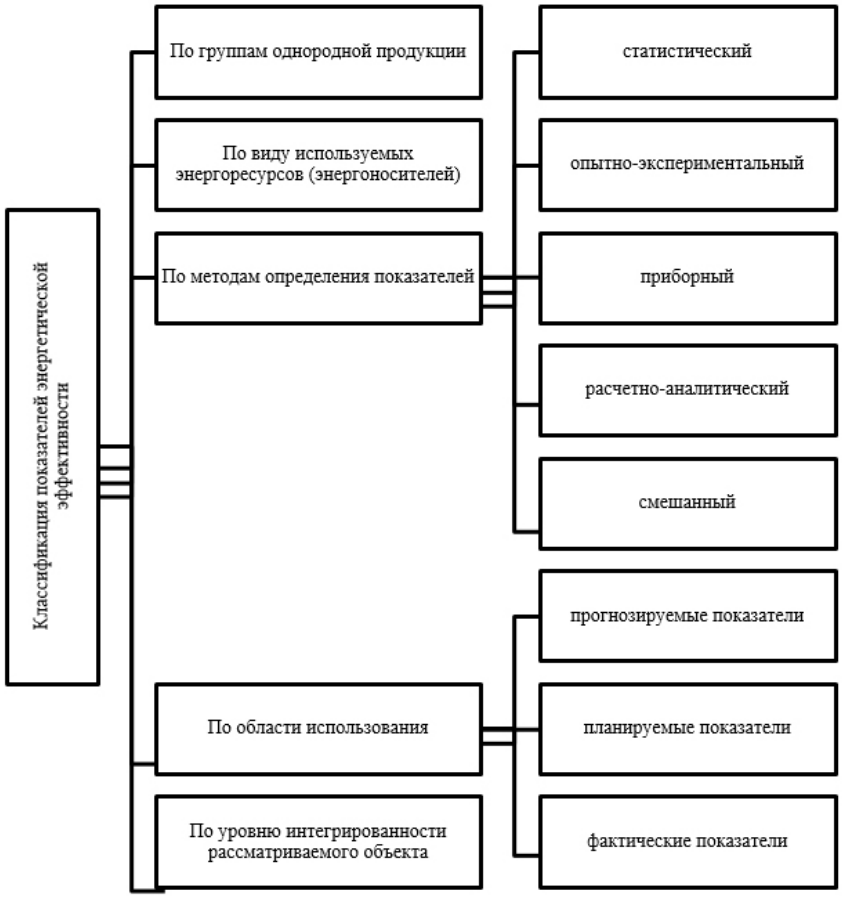


Рис. 2. Классификация показателей энергетической эффективности

Расчетно – аналитический метод основывается на использовании методик определения расчетных значений показателей при проектировании изделий.

Опытно-экспериментальный метод базируется на данных специально организованных экспериментов с опытными образцами энергопотребляющей продукции с проведением специальных измерений характеристик для оценки показателей энергоэффективности.

Статистический метод строится на подборе и обработке статистических данных по показателям энергоэффективности продукции, выбранным в качестве прототипов исследуемого образца.

Приборный метод вытекает из проведения специальных испытаний промышленных образцов продукции и измерений фактических значений показателей энергоэффективности.

Смешанный метод представляет собой комбинацию двух или большего числа вышеперечисленных методов.

Наиболее подходящим методом для создания нового показателя эффективности подходит смешанный метод, который будет включать в себя комбинацию из других методов. Смешанный метод дает возможность учесть разные стороны особенностей эксплуатации нефтепровода наиболее сбалансированно оценить эффективность применения различных способов энергосбережения.

Анализ источников [2, 3, 11] выявил критерии эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов, которые можно подразделить на энергетические, экономические, экологические и технологические.

Критерии эффективности магистральных нефтепроводов могут быть удельными, отнесенными к единице продукции, производительности, мощности, затрат, времени, расстояния, массе, стоимости и пр.; абсолютными или комплексными, состоящими из нескольких критериев. Следует заметить, что оптимизация по одному критерию совершенно не гарантирует оптимальной работы предприятия в целом.

Список литературы

1.ГОСТ ISO 17769-1-2014 Насосы жидкостные и установки. Основные термины, определения, количественные величины, буквенные обозначения и единицы измерения. Часть 1. Жидкостные насосы. М.: ИНК Издательство стандартов, 2015. 14 с.

2.ГОСТ 31531-2012. Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.

3. ГОСТ Р ИСО 50001-2012. Системы энергетического менеджмента. М.: Росстандарт, 2012. 60 с.

4.ГОСТ Р 51858-2002. Нефть. Общие технические условия. М.: Госстандарт России, 2002. 11 с.

5.РД 153-39.4-113-01. Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов. М., 2001. 10 с.

6.РД 3-30-1268-85. Методика нормирования расхода электроэнергии на транспорт нефти. М., 1985. 11 с.

7.РД-91.140.50-КТН-043-11. Методика расчёта расхода электроэнергии в трубопроводном транспорте нефти. М., 2011.

8.Справочный документ по наилучшим доступным технологиям обеспечения энергоэффективности // Портал-энерго. Эффективное энергосбережение. [Электронный ресурс] URL: http://portal-energo.ru/files/articles/portalenergo_ru_dokument_es_po_e_ef.pdf (дата обращения: 10.05.2024).

9.Энергетическая политика ОАО «АК «Транснефть» // Официальный сайт ООО «Транснефть–Балтика». [Электронный ресурс] URL: http://baltneft.transneft.ru/u/section_file/1388/Energy_Policy_Transneft.pdf (дата обращения:10.05.2024).

10. ISO 50001:2011 Energy management systems – Requirements with guidance for use. Switzerland, 2011. 23 p.

11. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» // Российская газета. 27 ноября 2009 г. Федеральный выпуск № 5050 (226).

Гильдебрандт Маргарита Ивановна, канд. техн. наук, доцент, migildebrandt@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

REVIEW OF REGULATORY AND TECHNICAL DOCUMENTS IN THE FIELD OF ENERGY SAVING

M.I. Hildebrandt

The most significant regulatory and technical documents in the field of energy saving are considered and the main criteria for the efficiency of operation of main oil pipelines are identified.

Key words: petroleum products, energy saving, pump, oil pipeline loading.

Hildebrandt Margarita Ivanovna, candidate of technical sciences, docent, migildebrandt@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 622.692
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-5-6

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

М.И. Гильдебрандт

В статье описана методика подбора наилучших режимов с точки зрения эффективности эксплуатации насосного оборудования. Данная методика позволяет формировать план эксплуатации нефтепровода.

Ключевые слова: нефтепродукты, энергосбережение, насос, загрузка нефтепровода.

Методика определения эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов применима для технологического участка магистрального нефтепровода или нефтепродуктопровода. Исходными данными для расчёта являются:

1) Свойства транспортируемой жидкости (плотность ρ, вязкость υ).

2) Геометрические характеристики трубопровода: диаметр *D*, толщина стенки трубопровода *δ*, длина *L*, сжатый профиль Z, расположение НПС (рисунок 1).

Допущения:

1.Работу нефтепровода предполагается на квазистационарных режимах. Считается, что время переходов трубопровода с режима на режим пренебрежимо мало по сравнению с работой на каждом режиме. При работе отдельным режимом значение параметров не меняются во времени. 2. Влияние инерционных процессов, связанных с изменением режима, пренебрежимо мало. 3. Учитывается распределение свойств нефти ν(l, T), ρ(l, T), температуры жидкости T(l), давления P(l), диаметра трубопровода, высотного расположение точек трубопровода по его длине. 4. Задано местоположение головной промежуточных НПС, количество и схемы включения насосных агрегатов, потери давления на регуляторах.

Следующим этапом в соответствии с планами и перспективами транспортировки определяются расходы по длине технологического участка (рисунок 3) с учетом путевых сбросов и подкачек. Уточняются свойства нефти и появление новых партий с учетом изменения производительностей основного потока и подкачек.

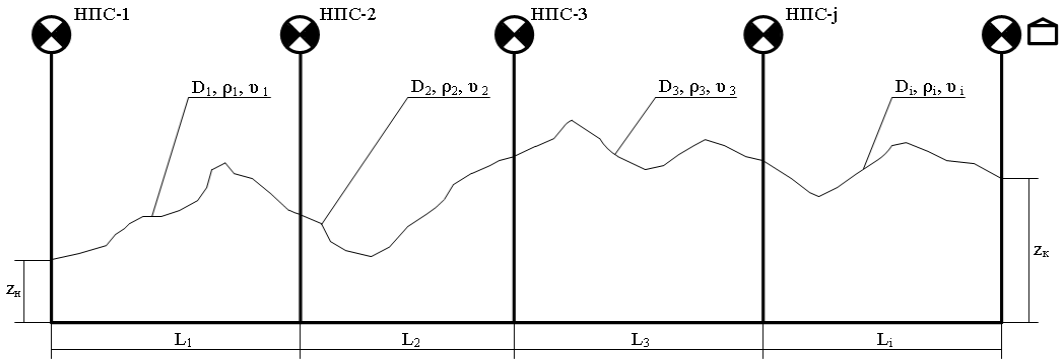


Рис. 1. Геометрические характеристики трубопровода: i – номер участка трубопровода;j – номер нефтеперекачивающей станции (НПС); 3 – прочностные характеристики материала стенок трубопровода; 4 – несущая способность трубопровода; 5 – расходно-напорные и мощностные характеристики насосного оборудования НПС (рисунок 2); 6 – технологические схемы подключения насосов, трубопроводов, лупингов; 7 – место положения точек сброса и подкачки; 8 – максимальная пропускная способность межстанционных участков

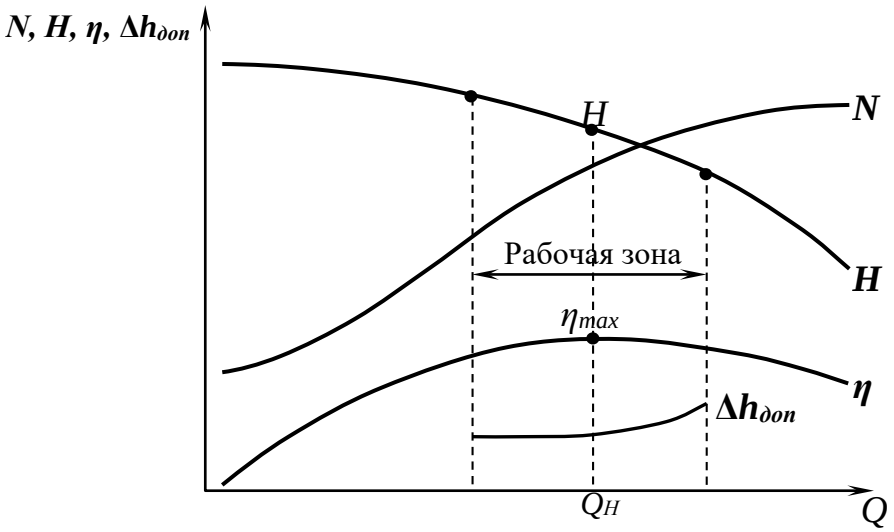


Рис. 2. Характеристика центробежного насоса: N – потребляемая мощность насосной установки, кВт; H – развиваемый напор, м; η – коэффициент полезного действия (КПД.); Δhдоп – допустимый кавитационный запас от подачи Q, м; ηмех – коэффициент полезного действия механической передачи

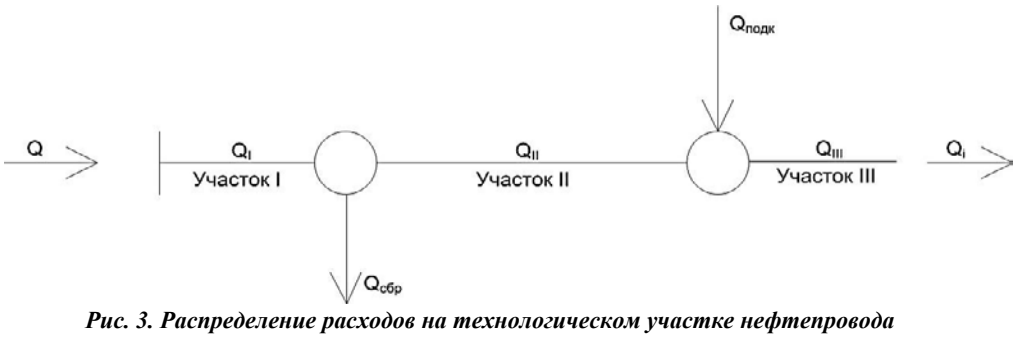


Рис. 3. Распределение расходов на технологическом участке нефтепровода

Рассматриваются все технические возможности включения магистральных насосов в процесс перекачки и технологические схемы их сборки. Возможные комбинации включения насосов определяют спектр допустимых технологических режимов.

Далее, для каждого режима, задаваемого технологической схемой сборки и набором включенных насосов определяется рабочая производительность режима для каждого насоса и участка трубопровода с учетом параллельных либо последовательных соединений, заданных производительностей сбросов и подкачек [1-3].

Задавая комбинацию включения насосных агрегатов каждого технологического режима для получения рабочей точки, составляем уравнение баланса энергий технологического участка.

Запишем уравнение Бернулли для расчёта установившихся течений однородной несжимаемой жидкости:

$$\left(\frac{p_H}{\rho \cdot g} + z_H + \frac{w_H^2}{2g}\right) - \left(\frac{p_K}{\rho \cdot g} + z_K + \frac{w_K^2}{2g}\right) = h_{mp}, \tag{1}$$

где p_H и p_K – давление в начале и в конце трубопровода, Па; z_H и z_K – высотные отметки начала и конца трубопровода, м; w_H и w_K – соответственно скорость в начальном и конечном сечении трубопровода, м/с; h_{mp} – потери напора между начальным и конечным сечением трубопровода, м.

Преобразуем уравнение (1) в дифференциальную форму, для этого сначала умножим левую и правую часть уравнения на ρg:

$$p_H - p_K + \rho g(z_H - z_K) + \frac{\rho}{2}(w_H^2 - w_K^2) = h_{mp} \cdot \rho g, \tag{2}$$

$$dp + \rho g \cdot dz + \frac{\rho}{2} dw^2 = h_{mp} \cdot \rho g,$$

$$dp + \rho g \cdot dz + \frac{\rho}{2} 2\rho \cdot dw = h_{mp} \cdot \rho g,$$

$$dp + \rho g \cdot dz + \rho w \cdot dw = h_{mp} \cdot \rho g.$$

Потери напора на трение по длине в трубопроводе определяют по формуле Дарси-Вейсбаха

$$h_{mp} = \lambda \cdot \frac{dl}{D} \cdot \frac{w^2}{2g}, \tag{3}$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления или коэффициент Дарси; D – внутренний диаметр трубы, м; l – длина нефтепровода, м.

Подставим в уравнение Бернулли формулу для нахождения потерь напора по длине dl трубопровода:

$$dp + \rho g \cdot dz + \rho w \cdot dw = \rho g \cdot \lambda \cdot \frac{w^2}{2g} \cdot \frac{dl}{D}, \tag{4}$$

$$dp + \rho g \cdot dz + \rho w \cdot dw = \rho \cdot \lambda \cdot \frac{w^2}{2g} \cdot \frac{dl}{D}. \tag{5}$$

Выразим из уравнения перепад давлений dp по длине dl

$$dp = \lambda \cdot \frac{\rho}{D} \cdot \frac{w^2}{2} dl - \rho g \cdot dz - \rho w \cdot dw. \tag{6}$$

Выразим все переменные, которые зависят от длины трубопровода l:

$$dp = \lambda(l) \cdot \frac{\rho(l)}{D(l)} \cdot \frac{w^2(l)}{2} dl - \rho(l) g \cdot dz - \rho(l) w(l) \cdot dw. \tag{7}$$

Найдём дифференциал функции давления

$$dp = \lambda(l) \cdot \frac{\rho(l)}{D(l)} \cdot \frac{w(l)^2}{2} dl - \rho(l) g \cdot \frac{\partial z}{\partial l} dl - \rho(l) w(l) \cdot \frac{\partial w}{\partial l} dl, \tag{8}$$

$$dp = \left[\lambda(l) \cdot \frac{\rho(l)}{D(l)} \cdot \frac{w(l)^2}{2} - \rho(l) g \cdot \frac{\partial z}{\partial l} - \rho(l) w(l) \cdot \frac{\partial w}{\partial l}\right] dl. \tag{9}$$

Интегрированием получаем перепад давления на участке трубопровода длиной l_i

$$\Delta p = \int_{l=0}^{l_i+1} \left[\lambda(l) \cdot \frac{\rho(l)}{D(l)} \cdot \frac{w(l)^2}{2} - \rho(l) g \cdot \frac{\partial z}{\partial l} - \rho(l) w(l) \cdot \frac{\partial w}{\partial l}\right] dl. \tag{10}$$

Для всего технологического участка, состоящего из n участков, уравнение имеет вид:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^{n} \int_{l=0}^{l_i+1} \left[\lambda(l) \cdot \frac{\rho(l)}{D(l)} \cdot \frac{w^2(l)}{2} - \rho(l) g \cdot \frac{\partial z}{\partial l} - \rho(l) w(l) \cdot \frac{\partial w}{\partial l}\right] dl. \tag{11}$$

В любом сечении трубопровода скорость течения жидкости определяется:

$$w(l) = \frac{4 \cdot Q(l)}{\pi \cdot D(l)^2}. \tag{12}$$

Число Рейнольдса будет определяться по формуле:

$$\mathrm{Re}(l) = \frac{w(l) \cdot D(l)}{\nu(l)}. \tag{13}$$

Подставим выражение (12) в (11) и получим

$$\Delta p = \sum_{i=1}^{n} \int_{l=0}^{li+1} \left[\lambda(l) \cdot \frac{\rho(l)}{} \cdot \frac{8Q^2(l)}{\pi^2 D^5(l)} - \rho(l) g \frac{\partial z}{\partial l} - \rho(l) \frac{4Q(l)}{\pi D^2(l)} \frac{\partial (4Q(l)/\pi D(l)^2)}{\partial l} \right] dl. \quad (14)$$

Перепад давления, создаваемый насосом:

$$\Delta p = \rho(l) g H(Q(l)) k1/k2. \quad (15)$$

где k_1-число последовательно включенных ступеней насосов; k_2-число параллельно работающих насосов.

От полученного гидростатического напора на входе регулятора отнимается напор включенного насоса, рассчитанный по проходящему через насос расходу по его паспортной расходно-напорной характеристике.

$$\Delta p_j = \sum_{i=1}^{m} [(\sum_{k=1}^{n} \Delta p_{ijk}) - \Delta p_{Rij}]. \quad (16)$$

где n-кол-во насосов; m – количество станций; Δp_{Rj}- давление на регуляторе, МПа.

Если подставить выражение (15) в уравнение (16) получим:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^{m} [(\sum_{k=1}^{n} \rho(l) g H(Q(l)) k1/k2)) - \Delta p_{Rij}]. \quad (17)$$

Приравниваем (14) и (17), уравнение баланса энергий технологического участка имеет следующий вид:

$$p_{атм.н} + \rho_н g H_н = p_{атм.к} + \rho_к g H_к + \sum_{i=1}^{m} [(\sum_{k=1}^{n} \rho(l) g H(Q(l)) k1/k2)) - \Delta p_{Rij}] - \\ - \sum_{i=1}^{n} \int_{l=0}^{li+1} \left[\lambda(l) \cdot \frac{\rho(l)}{} \cdot \frac{8Q^2(l)}{\pi^2 D^5(l)} - \rho(l) g \frac{\partial z}{\partial l} - \rho(l) \frac{4Q(l)}{\pi D^2(l)} \frac{\partial (4Q(l)/\pi D(l)^2)}{\partial l} \right] dl. \quad (18)$$

Уравнение (17) решается относительно *Q(l)* методом последовательных приближений. При различных комбинациях включения насосов и функциях распределения свойств нефти, температуры жидкости, давления, диаметра трубопровода, высотного положения точек трубопровода по его длине находится величина *Q(l),* определяющая рабочую точку для каждого технологического режима.

Полученный таким образом режим проверяется на возможность технической реализации, для чего построенная линия гидростатических напоров помещается в коридор допустимых напоров, рассчитываемый через разрешенные предельные давления эксплуатации нефтепровода по данным раскладки трубы (толщины и материала стенок, диаметра, профиля трубопровода) и плотности жидкости [4, 5]. При этом также учитывается необходимый кавитационный запас на входе насосов НПС и ограничения по разрешенному давлению в отдельных локальных местах нефтепровода, связанных с наличием дефектов или оборудования с пониженным разрешенным давлением.

Если режим не проходит по технологическим ограничениям, он либо бракуется, либо подвергается регулировке изменением характеристик регуляторов, трубопровода, нефти, насосов, после чего решение повторяется.

После выполнения расчетов при различных комбинациях включения насосов получается набор технически реализуемых технологических режимов, из которых, в зависимости от требуемых объемов годовой, месячной или суточной поставки нефти подбираются наилучшие с точки зрения эффективности эксплуатации насосного оборудования режимы, и формируется план эксплуатации нефтепровода.

Список литературы

1. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по спец. «Проектирование, сооружение и эксплуатация нефтегазопроводов и газонефтехранилищ» направления «Нефтегазовое дело». Москва: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2003. 335 с.

2. Коршак А.А. Нефтеперекачивающие станции. Ростов н/Д: ООО «Феникс», 2015. 269 с.

3. Лурье М.В., Астрахан И.М., Кадет В.В. Гидравлика и ее приложения в нефтегазовом производстве: учебное пособие. М.: МаксПресс, 2010. 331 с.

4. Коршак А.А., Нечваль А.М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов: учебник для вузов. СПб.: Недра, 2008. 488 с.

5. Краус Ю.А. Проектирование и эксплуатация магистральных нефтепроводов. Часть 1: Основные факторы, влияющие на особенности эксплуатации и выбор проектных параметров магистральных нефтепроводов. Омск: Изд-во: ОмГТУ, 2010.

Гильдебрандт Маргарита Ивановна, канд. техн. наук, доцент, migildebrandt@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

DESCRIPTION OF THE METHOD OF DETERMINING THE EFFICIENCY OF OPERATION OF MAIN OIL PIPELINES

M.I. Gildebrandt

The article describes the method of selecting the best modes from the point of view of the efficiency of operation of pumping equipment. This method allows you to form a plan for the operation of an oil pipeline.

Key words: oil products, energy saving, pump, loading of an oil pipeline.

Hildebrandt Margarita Ivanovna, candidate of technical sciences, docent, migildebrandt@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 621.9.06; 331.101.6; 330.322.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-9-10

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ УНИВЕРСАЛЬНЫМИ ДИСКОВЫМИ БУНКЕРНЫМИ ЗАГРУЗОЧНО-ОРИЕНТИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ ИЗДЕЛИЙ ПАТРОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.С. Клентак, Е.В. Пантюхина, И.В. Пузиков

В статье приведена методология проведения технико-экономического анализа процесса автоматической загрузки различных заготовок и элементов патронов с явной и неявной асимметрией на примере разработанного универсального дискового бункерного загрузочно-ориентирующего устройства. Представлены результаты оценки конкурентоспособности процесса производства элементов патронов с явной и неявной асимметрией с применением разработанного устройства.

Ключевые слова: элементы патронов с явной асимметрией, элементы патронов с неявной асимметрией, бункерные загрузочно-ориентирующие устройства, себестоимость производства изделий, технологическое качество, производительность труда.

В последнее время в нашей стране происходит существенное изменение ситуации на рынке боеприпасов, обусловленное значительным увеличением государственного оборонного заказа на массовое производство патронов, увеличением их номенклатуры и расширением типоразмеров [1]. В сложившейся ситуации необходимо с максимальной эффективностью использовать все производственные мощности, значительно сократить сроки производства изделий, повысить производительность и надежность технологического оборудования. В связи с этим при производстве патронов возникает целый комплекс важнейших задач, требующих рациональных и обоснованных решений в кратчайшие сроки.

При оценке их технологичности для автоматической загрузки было выявлено, что предметы обработки с неявной асимметрией очень сложно ориентировать. Поэтому средства автоматической загрузки, которые ранее широко применялись для предметов обработки с явной асимметрией (явно выраженными «ключами ориентации»), перестали быть эффективными для предметов обработки с неявной асимметрией, что привело к резкому снижению производительности труда и выраженным проблемам в сфере надежности производимой продукции, в связи с использованием ручного труда на технологической линии [2].

Для решения этой проблемы была разработана методология проектирования универсальных дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств для широкой номенклатуры изделий (далее – «БЗУ типа I») на базе бункерного загрузочного устройства с радиальными профильными карманами и переориентатором в верхней части бункера для цилиндрических стаканов с асимметрией концов (далее – «БЗУ типа 0»), которое ранее применялось для ориентации предметов обработки с явной асимметрией.

Разработанное «БЗУ типа I», прежде всего, решает важную задачу надежной автоматической загрузки в необходимом ориентируемом положении и с требуемой производительностью элементов патронов с неявной асимметрией, а также возможно его применение и для элементов патронов с явной асимметрией.

На рис. 1 представлена схема процесса захвата и ориентирования в усовершенствованном «БЗУ типа I», которое представляет собой два соответствующих профилю асимметричного торца заготовки кольца, которые соединены между собой с целью регулирования [3]. Усовершенствованное БЗУ с регулируемым ориентатором и копиром позволяет с помощью переналаживания отрегулировать расстояния между кольцами, что позволит использовать данное БЗУ для заготовок одинаковой длины, но различных диаметров торцов. В верхней части бункера БЗУ располагается копир, переворачивающий (переориентирующий) неправильно запавшие в карманы заготовки. Это позволяет уже их ориентировать не пассивным, а активным способом, что приводит к повышению фактической производительности усовершенствованного БЗУ, согласно описанной в работах [4,5] концепции [1, 2].

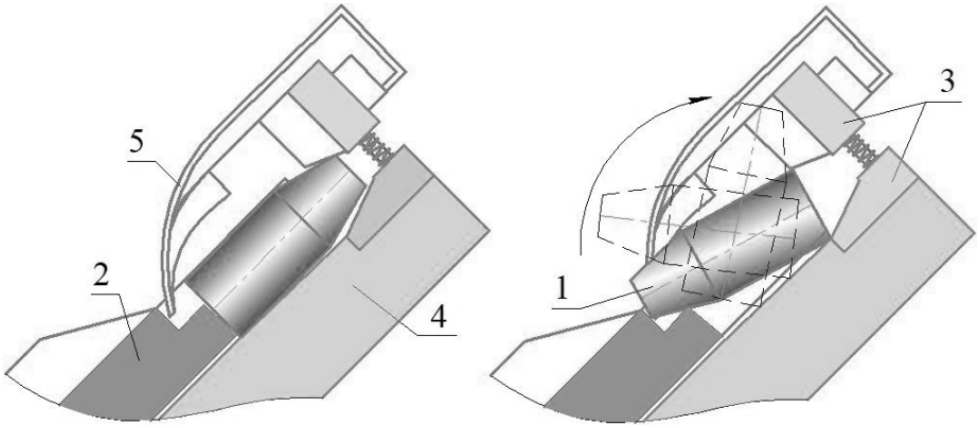


Рис. 1. Схема ориентирования в «БЗУ типа I» с регулируемым ориентатором и копиром для переориентирования заготовок:
1 – заготовка; 2 – диск с органами захвата; 3 – кольца ориентатора;
4 – основание; 5 – копир

Целью данной работы является проведение технико-экономического анализа производства элементов патронов с явной и неявной асимметрией с применением разработанного устройства «БЗУ типа I». Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) Разработать методологию проведения технико-экономического анализа процесса производства элементов патронов [6,7];

2) Провести технико-экономический анализ процесса производства элементов патронов с явной асимметрией с применением «БЗУ типа I» на базе «БЗУ типа 0»;

3) Провести технико-экономический анализ процесса производства элементов патронов с неявной асимметрией без применения «БЗУ типа I» и с применения «БЗУ типа I».

Методология проведения технико-экономического анализа процесса производства элементов патронов. Для оценки уровня себестоимости производства элементов патронов в работе будем вести речь о некотором оптимальном выпуске продукции V.

В задачах организации производства вопрос оптимального объема выпуска решается через следующий подход: если спрос на продукцию (*S*) ниже максимально возможного объема выпуска продукции (V_{max}), то за оптимальный объем выпуска принимается *S*; если же, наоборот, максимально возможный объема выпуска продукции (V_{max}) ниже спроса на продукцию (*S*), то за оптимальный объем выпуска принимается V_{max}. В следствии того, что *S* на исследуемую продукцию в работе крайне высок, в работе за оптимальный объем выпуска продукции примем V_{max} [8].

Таким образом, оптимальный объем выпуска продукции одного типа за год V_{max} на одном устройстве составит:

$$V_{max} = B_{БЗУ} \cdot t_{\ БЗУ}, \quad (1)$$

где $B_{БЗУ}$ – выработка элементов патронов, *шт./мин.*; $t_{\ БЗУ}$ – продолжительность работы за год с установленной выработкой, *ч.*

Годовой расход электроэнергии в процессе производства оптимального объема V_{max} элементов патронов составит:

$$W_{ЭЗ} = W_{Э} \cdot t_{БЗУ}, \quad (2)$$

где $W_{Э}$ – электрическая мощность устройства, кВт.

Годовые затраты на покупку электроэнергии составят:

$$З_{Э} = W_{Э} \cdot \tau_{э}, \quad (3)$$

где $\tau_{э}$ – средний тариф на электроэнергию на территории центрального федерального округа, руб./кВт·ч.

Годовые затраты на изготовление или проведение модернизационных работ на бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах, а также затраты на изготовление иных расходных материалов на производство одного вида изделия на одном устройстве составят:

$$З_{БЗУ} = З_{пр} + З_{из} + С_{рм}, \quad (4)$$

где $З_{пр}$ – затраты на проектирование, руб.; $З_{из}$ – затраты на изготовление, руб.; $С_{рм}$ – стоимость материалов (металл, крепежные соединения), *руб.*

Годовые затраты на оплату труда, (с учетом 30 % на страховые взносы) персонала на одном устройстве составят:

$$З_{ОТ} = З_{всп} \cdot t_{всп} + З_{осн} \cdot t_{осн}, \quad (5)$$

где $З_{всп}$ – средняя стоимость часа вспомогательного персонала, *руб./ч.*; $t_{всп}$ – продолжительность работы за год на обслуживание одного устройства, ч.; $З_{осн}$ – средняя стоимость часа основного персонала, *руб./ч.*; $t_{всп}$ – продолжительность работы за год основного персонала на одном устройстве, ч.

Прочие затраты в размере 3% от суммы затрат на заработную плату, затрат на энергоресурсы материалы составят:

$$З_{Пр} = 0{,}03\left(З_{Э} + З_{ОТ} + З_{рм}\right). \quad (6)$$

Суммарные годовые эксплуатационные затраты составят:

$$Р_{Э} = З_{Э} + З_{рм} + З_{ОТ} + З_{Пр}. \quad (7)$$

Себестоимость процесса производства единицы элементов патронов на одном устройстве составит:

$$С_{Э} = \frac{Р_{Э}}{V_{max}}. \quad (8)$$

Приведенные затраты, не включают в себя затраты на материалы из которого производятся элементы патронов, а также капитальные затраты на приобретение бункерных загрузочно-ориентирующих устройств, отчисления на амортизацию данного оборудования и затраты на выплаты налога на основные фонды в связи с тем, что основная цель работы оценить наличие экономического эффекта при использовании модернизированного оборудования, а все вышеперечисленные расходы будут тождественны для всех рассматриваемых вариантов производства элементов патронов.

Для оценки производительности труда в технологическом процессе производства элементов патронов воспользуемся классическими подходами к оценке через выработку одного вида изделия в год на одном устройстве (V_{max}) и количество задействованных сотрудников:

$$ПТ_{БЗУ} = \frac{V_{max}}{n_{осн}+n_{всп}}. \quad (9)$$

Для оценки технологического уровня качества элементов патронов воспользуемся методикой, основанной на показателях *ppm* (число несоответствий на миллион единиц продукции):

$$ppm_{БЗУ} = \frac{V_{бр.эл.}}{V_{max}} \cdot 1\,000\,000. \quad (10)$$

В части разработанной методики необходимо отметить, что все приведенные показатели, такие как выработка продукции, себестоимость единицы продукции, производительность труда и ppm в мировой практике принято оценивать относительно внешних конкурентоспособных альтернатив. Однако, в связи со сложностью получения

такого рода данных по продукции ОПК, в работе конкурентноспособной альтернативой будет выступать «традиционный» способ производства элементов патронов. Для процесса производства элементов патронов с явной асимметрией за «традиционный» способ производства принимается устройство «БЗУ типа 0». Для процесса производства элементов патронов с неявной асимметрией за «традиционный» способ производства принимается применение ручного труда на технологической линии.

Выберем наиболее значимые критерии, по которым будет проводиться сравнение. Основными характеристиками технического совершенства БЗУ являются:

а) выработка, мин.;
б) ПТ, шт./чел.;
в) ppm.

Экономические показатели установки характеризуются следующими параметрами:

а) себестоимость единицы продукции, руб.

Технико-экономический анализ процесса производства элементов патронов с *явной* асимметрией с применением «БЗУ типа 1» на базе «БЗУ типа 0». Пример начальных условий для технико-экономической оценки процесса производства элементов патронов с явной асимметрией с применением «БЗУ типа 1» и «БЗУ типа 0» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Начальные условия процессов производства элементов патронов с явной асимметрией с применением «БЗУ типа 0» и «БЗУ типа 1»

Наименование	Единица измерения	Величина «БЗУ типа 1»	Величина «БЗУ типа 0»
Технические параметры устройств			
Электрическая мощность БЗУ	*кВт*	0,25	0,25
Выработка БЗУ	*шт./мин.*	270	160
Стоимостные показатели			
Стоимость модернизации устройства	*руб./шт.*	144 376,00	439 100,00
Стоимость изготовления расходных материалов (вспомогательного диска)	*руб./шт.*	-	32 375,00
Количество вспомогательного персонала	*чел.*	1	1
Количество основного персонала	*чел.*	-	-
Стоимость часа вспомогательного персонала, руб.	*руб.*	350,00	350,00
Стоимость часа основного персонала, руб.	*руб.*	500,00	500,00

Оценка конкурентоспособности процесса производства элементов патронов с явной асимметрией с применением «БЗУ типа 1» на базе «БЗУ типа 0» представлена в табл. 2.

Таблица 2

Оценка конкурентоспособности процесса производства элементов патронов с явной асимметрией с применением «БЗУ типа 1» на базе «БЗУ типа 0»

Критерии	Значимость критерия, λ_i	Сравниваемые типы БЗУ		Показатели конкурентоспособности	
		БЗУ типа 1	БЗУ типа 0	Единичный, g	Групповой, G
Характеристики технического совершенства					
1. Выработка БЗУ, шт.	0,35	270,00	160,00	1,6875	0,5906
2. ПТ, шт./чел.	0,3	31 104 000,00	18 432 000,00	1,6875	0,5063
3. ppm	0,35	4000	5000	1,2500	0,4375
Итого	1				1,5344
Экономические показатели					
1. Себестоимость единицы продукции, *руб.*	1	0,007669897	0,031221596	4,0707	4,0707
Итого	1				4,0707

Из таблицы следует интегральный показатель групповых технических и экономических показателей конкурентоспособности:

$$I=1{,}5344\cdot 4{,}0707=6{,}246.$$

Таким образом, сравниваемое устройство «БЗУ типа 1», по техническим и экономическим параметрам превосходит устройство «БЗУ типа 0» при принятых критериях значимости. Конкурентоспособность устройства «БЗУ типа 1» выше конкурентоспособности устройство «БЗУ типа 0» более чем в 6 раз.

Технико-экономический анализ процесса производства элементов патронов с *неявной* асимметрией с применением «БЗУ типа 1». Пример начальных условий для технико-экономической оценки процесса производства элементов патронов с неявной асимметрией с применением «БЗУ типа 1» представлены в табл. 3.

Таблица 3

Начальные условия процессов производства элементов патронов с неявной асимметрией с применением «БЗУ типа 1»

Наименование	Единица измерения	Величина «БЗУ типа 1»	Без применения «БЗУ типа 1»
Технические параметры устройств			
Электрическая мощность БЗУ	*кВт*	0,25	-
Выработка БЗУ	*шт./мин.*	270	50
Стоимостные показатели			
Стоимость модернизации устройства	*руб./шт.*	144 376,00	-
Стоимость изготовления расходных материалов (вспомогательного диска)	*руб./шт.*	-	-
Количество вспомогательного персонала	*чел.*	1	1
Количество основного персонала	*чел.*	-	1
Стоимость часа вспомогательного персонала, руб.	*руб.*	350,00	350,00
Стоимость часа основного персонала, руб.	*руб.*	500,00	500,00

Оценка конкурентоспособности процесса производства элементов патронов с неявной асимметрией с применением «БЗУ типа 1» представлена в табл. 4.

Таблица 4

Оценка конкурентоспособности процесса производства элементов патронов с неявной асимметрией с применением «БЗУ типа 1»

Критерии	Значимость критерия, $З_i$	Сравниваемые типы БЗУ		Показатели конкурентоспособности	
		БЗУ типа 1	БЗУ типа 0	Единичный, g	Групповой, G
Характеристики технического совершенства					
1. Выработка БЗУ, шт.	0,35	270,00	50	5,4	1,89
2. ПТ, шт./чел.	0,3	31 104 000,00	2 880 000,00	10,8	0,5063
3. ppm	0,35	4000	20 000	5,00	0,4375
Итого	1				6,88
Экономические показатели					
1. Себестоимость единицы продукции, *руб.*	1	0,007669897	0,17166667	22,3819	22,3819
Итого	1				22,3819

Из табл. 4 следует интегральный показатель групповых технических и экономических показателей конкурентоспособности:

$$I=6{,}88\cdot 22{,}3819=153{,}98.$$

Таким образом, процесс производства элементов патронов с неявной асимметрией с помощью устройство «БЗУ типа 1» по техническим параметрам более чем в 6,5 раз эффективнее применение ручного труда, в свою очередь по экономическим параметрам более чем в 20 раз эффективнее применения ручного труда.

На основании результатов проведенного анализа можно сделать однозначный вывод, что наиболее оптимальным решением для процессов производства элементов патронов с явной и неявной ассиметрией является устройство «БЗУ типа 1», вследствие высоких технических и экономических показателей конкурентоспособности. Аналагичный вывод можно сделать и при использовании других типов уни версальных бункерных загрузочно-ориентирующих устройств для широкой номенклатуры асимметричных изделий патронного производства.

Список литературы

1. Пантюхина Е.В. Лукин С.А., Васин С.А. Разработка универсальной конструкции механического дискового бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором для заготовок тел вращения в форме колпачка // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3. С. 44–51.

2. Пантюхина Е.В., Прейс В.В. Механические бункерные загрузочные устройства для элементов патронов стрелкового оружия с неявной асимметрией // В сборнике: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды XII общероссийской научно-практической конференции. В 3-х томах. Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»», Санкт- Петербург. 2020. С. 79-85.

3. Патент на полезную модель RU 220505 U1, 18.09.2023. Бункерное загрузочное устройство для цилиндрических заготовок с цилиндрической формой одного из торцов и конической формой другого / В.В. Прейс, Е.В. Пантюхина, И.В. Пузиков. Заявка № 2023108055 от 30.03.2023.

4. Васин С.А., Пантюхина Е.В. Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2023. № 3 (146). С. 64-88.

5. Пантюхина Е.В. Методология комплексного подхода для оценки производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств // В сборнике: Проблемы машиноведения. Материалы IV Международной научно-технической конференции. Научный редактор П.Д. Балакин. 2020. С. 380-388.

6. Клентак А.С. Бирюк В.В., Паньшин Р.Н., Пиунов В.Н. Оценка инвестиционной привлекательности системы энергоснабжения труднодоступного населенного пункта на базе тригенерационной криогенной энергосистемы // Вестник Самарского муниципального института управления. 2022. № 4. С. 24-37.

7. Klentak A.S., Panshin R.A. Assessment of the Level of Energy Efficiency of the Power Supply System of a Remote Settlement on the Basis of a Trigeneration Cryogenic Power System // 2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). 2023. P. 854-859.

8. Гришанов Г.М., Засканов В.Г., Курбатов В.П. Моделирование взаимодействий между предприятиями по производству газотурбинных установок // Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2016. 156 с.

Клентак Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, anna_klentak@mail.ru, Россия, Самара, Самарский университет,

Пантюхина Елена Викторовна, докт. техн. наук, доцент, e.v.pant@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пузиков Иван Валерьевич, магистрант, zalesniyr@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF AUTOMATIC LOADING OF CARTRIDGE PRODUCTS BY UNIVERSAL DISK HOPPER FEEDING AND ORIENTING DEVICES

A.S. Klentak, E.V. Pantyukhina, I.V. Puzikov

The article presents a methodology for conducting a technical and economic analysis of the process of automatic feeding of various workpieces and elements of cartridges with explicit and implicit asymmetry on the example of a developed universal disk hopper feeding and orienting device. Results of assessment of competitiveness of cartridge elements production process with explicit and implicit asymmetry with application of developed device are presented.

Key words: elements of cartridges with explicit asymmetry, elements of cartridges with implicit asymmetry, hopper feeding-orienting devices, cost of production of products, technological quality, labor productivity.

Klentak Anna Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, anna_klentak@mail.ru, Russia, Samara, Samara University,

Pantyukhina Elena Viktorovna, doctor of technical science, docent, e.v.pant@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Puzikov Ivan Valeryevich, postgraduate, zalesniyr@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.513
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-13-14

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРШНЕВОМ КОМПРЕССОРЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

М.В. Помошник, И. В. Наумчик, И.К. Прилуцкий, Ю.В. Татаренко

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния резонансных газодинамических явлений во всасывающей системе и частоты вращения коленчатого вала на производительность поршневого компрессора. Для этого разработан экспериментальный стенд для исследования рабочих процессов, протекающих в поршневом компрессоре. Получено уравнение регрессии для определения влияния частоты вращения и длины всасывающего трубопровода на производительность поршневого компрессора. Установлено, что в выбранном интервале варьируемых переменных по результатам данного многофакторного эксперимента производительность компрессора в большей степени зависит от частоты вращения коленчатого вала и в меньшей от длины всасывающего трубопровода.

Ключевые слова: поршневой компрессор, активный многофакторный эксперимент, рабочие процессы, интегральные параметры, акустический наддув, производительность, экспериментальный стенд, длина трубопровода, частоты вращения.

В процессе длительной эксплуатации технико-экономические показатели поршневого компрессора системы газоснабжения стартового комплекса утрачивают свои первоначальные значения. Как показывают результаты исследований, снижение производительности за 10- летний срок эксплуатации составляет 15-20 %, а увеличение удельного расхода электроэнергии на 10 – 12 % [6]. Это влечет за собой увеличение продолжительности работы системы, а как следствие снижение уровня готовности стартового комплекса в целом.

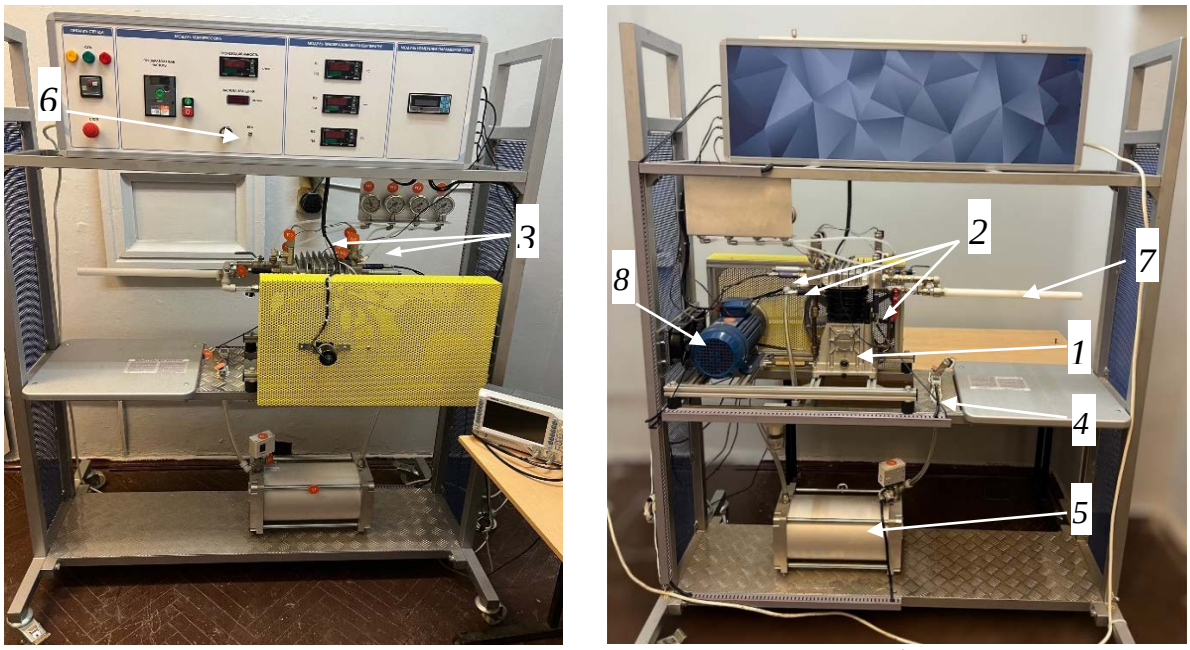
Выявление и использование внутренних резервов ПК для повышения его технико- экономических характеристик является актуальной задачей. Наряду с переводом поршневых компрессоров с кривошипно-шатунным механизмом на линейный привод [2] и применением теплообменных устройств [3], существует способ совершенствования машины за счет использования резонансных колебаний давления газа во всасывающей системе. Использование звуковых волн для повышения давления, имеет несколько ключевых преимуществ: компактность конструкции, низкая стоимость и гибкость применения.

В результате возвратно-поступательного движения поршня и работы клапанов в трубопроводной системе поршневого компрессора возникают упругие волны компримированного газа. Эти волны, отражаясь от препятствий – арматуры, технологических аппаратов, различных частей трубопровода, возвращаются к источнику. Отраженная волна встречается с прямой, и в зависимости от параметров трубопроводной системы в различных ее сечениях происходит сложение или вычитание их мгновенных значений. В случае резонанса за счет сложения амплитуд прямой и отраженной волн интенсивность колебательных процессов резко усиливается. Повышенная интенсивность колебаний газа может быть связана и со сложением в некоторых сечениях трубопроводной системы амплитуд гармоник импульса, генерируемого цилиндром компрессора, а также с амплитудами отдельных гармоник, обусловленными большими скоростями движения, малой диссипацией или недостаточным свободным объемом в трубопроводной системе. Волновые процессы происходят около уровня средних составляющих потока и изменяют в каждый момент времени величины параметров потока, т.е. давление, скорость, плотность и температура газа в любом сечении трубопроводной системы и в цилиндрах определяются суммой средней (стационарной) и динамической составляющих. Возникновение динамических составляющих потока связано с особенностями рабочего процесса, амплитуды, частоты и фазы волн, которые определяются конструкцией и размерами трубопроводной системы. Поэтому, изменяя конструкцию и размеры трубопроводной системы, можно изменить спектральный состав колебаний параметров потока газа в граничном с цилиндром сечении всасывающего трубопровода. Если к моменту закрытия всасывающего клапана суммарное давление в цилиндре отличается от среднего давления всасывания, то и производительность машины не будет совпадать с расчетной.

Целью работы является исследование и анализ интегральных параметров поршневого компрессора в зависимости от частоты вращения коленчатого вала при разных длинах всасывающего трубопровода.

Экспериментальная стенд. Изучение влияния частоты вращения коленчатого вала и длины всасывающего трубопровода на производительность и температуру сжимаемого газа проводилось за счет включения в состав экспериментального стенда регулятора частоты вращения электродвигателя и всасывающего трубопровода различной длины.

Для проведения экспериментального исследования рабочего процесса ПК с учетом акустического наддува был разработан и создан экспериментальный стенд (рис. 1), который состоит из следующих основных частей: двухступенчатый поршневой компрессор на базе ABAC 4900 *1*, комплекта динамических преобразователей давления 2, комплекта преобразователей температуры *3*, электронного расходомера термоанемометрического принципа действия *4*, ресивера *5*, регулятора частоты вращения электродвигателя *6*, всасывающего трубопровода *7* (разборная конструкция линии всасывания позволяет менять геометрические параметры трубопровода путем замены его на соответствующий большей или меньшей длины), электродвигателя *8*.



а *б*

Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования ступени ПК: а – вид спереди; б – вид сзади

Обработка экспериментальных данных по определению величин производительности поршневого компрессора и остальных характеристик производится с помощью методов статистической обработки. В результате была разработана методика планирования активного многофакторного эксперимента [1]. Активный многофакторный эксперимента позволяет получить уравнение с независимыми (ортогональными) оценками всех коэффициентов, входящих в уравнение и определяющих оптимальные условия процесса сжатия реального газа, что и является конечным результатом проводимых исследований.

Планирование эксперимента. Спланируем двухфакторный активный эксперимент для получения математической модели процесса сжатия и представим в виде полинома, т.е. отрезка ряда Тейлора, в который разлагается неизвестная функция:

$$y(x_1, x_2) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (1)$$

где b_0 – свободный член; b_1 – линейный эффект изменения частоты вращения; b_2 – линейный эффект изменения длины всасывающего трубопровода; b_{11} – квадратичный эффект изменения частоты вращения; b_{22} – квадратичный изменения длины всасывающего трубопровода; b_{12} – эффект попарного взаимодействия изменения частоты вращения и длины всасывающего трубопровода.

С целью сокращения числа опытов использован композиционный (последовательный) план эксперимента [5], который состоит из экспериментов ПФЭ, эксперимента в центре плана и в звездных точках, расположенных на осях фиктивного пространства. Таким образом общее количество опытов определяется формулой

$$N = N_0 + 2k + n_0, \quad (2)$$

где N_0 – число опытов полного факторного эксперимента 2^k; k – число факторов; n_0 – количество опытов в центре плана.

Композиционный план необходимо привести к ортогональному ввиду за счет выбора звездного плеча α. Длина «звездного плеча» α по формуле:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{N_0 N} - N_0}{2}}. \quad (3)$$

Тогда значение звездного плеча для двухфакторного эксперимента $\alpha = 1$.

На рисунке 2 представлен композиционный ортогональный план при $k = 2$: точки 1-4 образуют ПФЭ, точка 5 – центр плана, точки 6 - 9 – звездные точки.

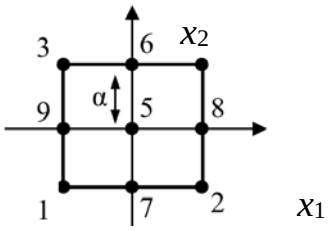


Рис. 2. Композиционный план второго порядка для $k = 2$

Для выполнения условия ортогональности матрицы планирования необходимо ввести столбцы с корректированными значениями уровня x', которые определяются по формуле

$$x' = x_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}{N}. \quad (4)$$

Для описания поверхности отклика полиномами второго порядка достаточно варьировать каждый фактор на трех уровнях. Закодируем уровни факторов так, что $+1$ будет обозначать верхний уровень соответствующего фактора, 0 – средний, а -1 - нижний. В таблице 1 представлены натурные и кодированные значения выбранных факторов.

Таблица 1

Уровни варьирования факторов

Варьируемые факторы	Обозначение факторов		Нижний уровень	Средний уровень	Верхний уровень
	натур.	кодир.	-1	0	$+1$
Частота вращения	n, об/мин	x_1	400	500	600
Длина всасывающего трубопровода	$L_{тр}$, мм	x_2	100	850	1700

Пределы изменения переменных факторов ограничивались возможностью применяемого поршневого компрессора и размерами помещения, физико-химическими свойствами используемых материалов и выбирались из соображений оптимальности проведения процесса. Остальные параметры процесса сжатия во всех опытах поддерживались постоянными: давление на вход в трубопровод – $p_{вс} = 0{,}1$ МПа, ход поршня – $S_п = 50$ мм, диаметр I ступени – $D_ц^I = 95$ мм, диаметр трубопровода – $d_{тр} = 15$ мм, относительное мертвое пространство – $a = 0{,}05$. В качестве выходного параметра y принята объемная производительность V, л/мин.

Каждый опыт повторялся дважды ($\gamma = 2$). Полное количество опытов определяется числом $N = 2^k \gamma$, где k – количество факторов [8].

Результаты экспериментов и их анализ. Работа экспериментального стенда осуществляется следующим образом:

1. Предварительно стенд подключается к источнику электроэнергии и осуществляется проверка работоспособности всех контрольно-измерительных приборов.

2. Устанавливаются необходимые параметры частоты вращения коленчатого вала и длина всасывающего трубопровода, соответствующие номеру опыта.

3. Запускается экспериментальный стенд с последующей регистрацией изменения параметров с помощью системы сбора данных, которые выводятся на экран ПК и на модуль управления индикации.

4. Полученные результаты анализируются для оценки эффективности работы поршневого компрессора при различных режимах его работы.

В таблице 2 приведена матрица ортогонального планирования и результаты экспериментов

Таблица 2

Матрица ортогонального планирования и результаты экспериментов

Номер опыта	Факторы и выходной параметр							
	Факторы в натуральном масштабе		Факторы в безразмерной системе координат			Выходной параметр		Среднее значение выходного параметра
	n, об/мин	L, мм	x_0	x_1	x_2	y_1	y_2	$\overline{y}$
1	600	1700	0	+	+	12,98	13,02	13,0
2	400	100	0	–	–	9,11	9,18	9,15
3	600	100	0	+	–	13,69	13,72	13,71
4	400	1700	0	–	+	9,40	9,43	9,42
5	500	850	0	0	0	11,82	11,83	11,83
6	600	850	0	+	0	15,13	15,12	15,13
7	400	850	0	–	0	9,24	9,27	9,26
8	500	1700	0	0	+	11,14	11,09	11,12
9	500	100	0	0	–	11,42	11,49	11,46

Проверим экспериментальные данные на нормальность распределения и однородность. Для этого рассчитаем линейные коэффициенты регрессии по следующим формулам:

$$b_1 = \frac{\sum(x_1\overline{y})}{6};\ b_2 = \frac{\sum(x_2\overline{y})}{6};\ b_{11} = \frac{\sum((x_1')^2\overline{y})}{2};\ b_{22} = \frac{\sum((x_2')^2\overline{y})}{2};$$
$$b_{12} = \frac{\sum(x_1x_2\overline{y})}{4};\ b_0 = \frac{\sum(x_0\overline{y})}{9} - 0{,}67b_{11} - 0{,}67b_{22}. \quad (5)$$

С учетом формул (5) и значений табл.2 получим:

$$b_1 = \frac{1}{6}(13{,}0 - 9{,}15 + 13{,}7 - 9{,}4 + 15{,}1 - 9{,}26) = 2{,}33;$$

$$b_2 = \frac{1}{6}(13{,}0 - 9{,}15 - 13{,}7 + 9{,}4 + 11{,}1 - 11{,}46) = -0{,}136.$$

Для определения коэффициентов парного и квадратичного влияния на выходной параметр, учитывая формулу (4), составим расширенную матрицу (табл. 3)

Таблица 3

Расширенная матрица ортогонального планирования

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	$(x_1')^2$	$(x_2')^2$	x_1x_2	$\overline{y}$
1	+	+	+	+ 0,33	+ 0,33	+	13,0
2	+	–	–	+ 0,33	+ 0,33	+	9,15
3	+	+	–	+ 0,33	+ 0,33	–	13,71
4	+	–	+	+ 0,33	+ 0,33	–	9,42
5	+	0	0	– 0,67	– 0,67	0	11,83
6	+	+	0	+ 0,33	– 0,67	0	15,13
7	+	–	0	+ 0,33	– 0,67	0	9,26
8	+	0	+	– 0,67	+ 0,33	0	11,12
9	+	0	–	– 0,67	+ 0,33	0	11,46
$\sum$	9	6	6	2	2	4	

С учетом данных, приведенных в таблице 3, и формул 5 получим:

$$b_{11} = \frac{\left(\begin{array}{l}0{,}33\cdot13{,}0 + 0{,}33\cdot9{,}15 + 0{,}33\cdot13{,}7 + 0{,}33\cdot9{,}4 - 0.67\cdot11{,}83 + 0{,}33\cdot15{,}1 + 0{,}33\cdot9{,}26 - \\ - 0{,}67\cdot11{,}1 - 0{,}67\cdot11{,}465\end{array}\right)}{2} = -0{,}0373;$$

$$b_{11} = \frac{\left(\begin{array}{l}0{,}33\cdot13{,}0 + 0{,}33\cdot9{,}15 + 0{,}33\cdot13{,}7 + 0{,}33\cdot9{,}4 - 0.67\cdot11{,}83 - 0{,}33\cdot15{,}1 - 0{,}67\cdot9{,}26 + \\ + 0{,}33\cdot11{,}1 + 0{,}33\cdot11{,}465\end{array}\right)}{2} = -0{,}9;$$

$$b_{12} = \frac{(13{,}0 + 9{,}15 - 13{,}7 - 9{,}4)}{4} = -0{,}23;$$

$$b_0 = \frac{(13{,}0 + 9{,}15 + 13{,}7 + 9{,}4 + 11{,}83 + 15{,}1 + 9{,}26 + 11{,}1 + 11{,}465)}{9} - 0{,}67b_{11} - 0{,}67b_{22} = 12{,}18 .$$

Перед построением математической модели необходимо проанализировать данные эксперимента с помощью критерия Кохрена [7] для оценки дисперсии результатов наблюдений. Рассчитанный критерий Кохрена меньше табличного ($0{,}604 < 0{,}9065$) для уровня значимости $\alpha = 0{,}05$. Следовательно, результаты, полученные в ходе эксперимента, подчинены нормальному закону распределения, независимы и математические ожидания значений выходной переменной будут равны истинным значениям целевой функции.

В результате расчета было получено следующее уравнение регрессии:

$$y(x_1, x_2) = 12{,}18 + 2{,}33x_1 - 0{,}136x_2 - 0{,}0373x_1^2 - 0{,}9x_2^2 - 0{,}23x_1x_2 . \qquad (6)$$

Полученное уравнение (6) адекватно описывает экспериментальные данные, так как расчетное значение критерия Фишера $F = 0{,}0023$ меньше табличного $F_{\text{табл}} = 7{,}7$ [7] $\left(F < F_{\text{табл}}\right)$.

Графическая интерпретация исследуемой зависимости представлена на рисунке 2.

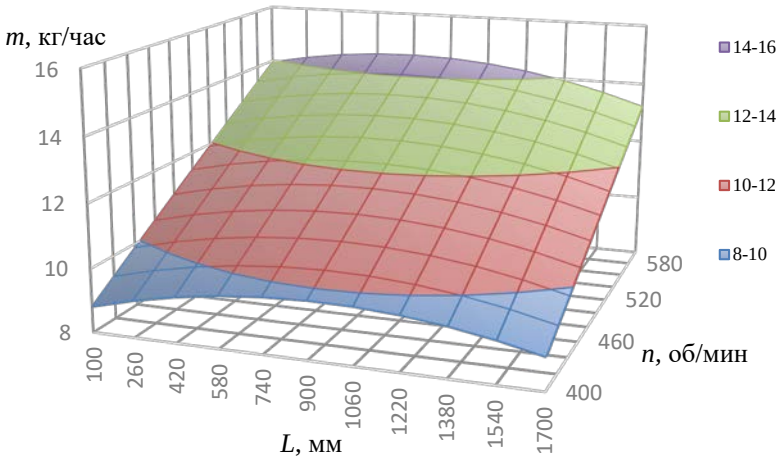


Рис. 3. Поверхность отклика для двух факторов

Наглядное представление о вкладе независимых факторов показывает (рис.2), что основное влияние на изменение производительности оказывает частота вращения коленчатого вала, что подтверждается результатами работ [4, 6]. При частоте n = 600 об/мин оптимальное значение длины трубопровода составляет 850 мм, при которой проявляются резонансные явления, способствующие интенсификации производительности поршневого компрессора на 10,7 % по сравнению с длиной трубопровода 100 мм. В то же время при работе поршневого компрессора с n = 500 об/мин и длиной всасывающего трубопровода L = 850 мм колебательные явления, возникающие во всасывающей системе, оказывают негативное влияние на производительность компрессора. Это вызвано в первую очередь фазой наступления максимального давления в трубопроводе по отношению к мертвой точке положения поршня, когда происходит закрытие всасывающих клапанов. В том случае, когда максимальный прирост давления в волне колебательного процесса не совпадает с моментом закрытия всасывающего клапана при нахождении поршня в мертвом пространстве происходит нарушение работы органов распределения, проявляющееся в запаздывании закрытия всасывающего клапана и возникновении явления «флаттера»[2]. Отсюда следует, что для каждого режима работы поршневого компрессора необходимо определять свою резонансную длину всасывающего трубопровода, которая приводит к максимальной прибавке его производительности.

Заключение. В данной работе представлена практическая комплексная оценка влияния двух независимых факторов на производительность поршневого компрессора. К этим факторам относятся частота вращения коленчатого вала, влияющая на изменение объема сжатого газа за определенный период времени, и переменная длина всасывающего трубопровода, обуславливающая совпадение частот собственных и вынужденных колебаний. Экспериментально подтвержден положительный эффект акустического наддува за счет совершенствования конструкции поршневого компрессора. Получено уравнение регрессии для определения оптимальных резонансных параметров всасывающих систем при различных режимах работы поршневого компрессора.

Исходя из этого, можно сделать вывод о возможности использования резонансной интенсификации производительности как при модернизации действующего поршневого компрессора системы газоснабжения на стадии эксплуатации, так и при проектировании новых компрессоров.

Список литературы

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский // Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Наука, 1976. 279 с.

2. Анализ рабочих процессов и оценка уровня механического КПД поршневых компрессоров с линейным приводом для систем газоснабжения и жизнеобеспечения объектов вооружения / И.В. Ворошилов, А.В. Казимиров, Ю.И. Молодова, А.В. Молостов, А.И. Прилуцкий, И.К. Прилуцкий // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. Вып. 671. С. 259–279.

3. Пат. 2734088 Российская Федерация. Ступень поршневого компрессора с жидкостным охлаждением / Пеньков М.М., Казимиров А.В., Молостов А.В., Прилуцкий И.К., Ведерников М.В., Молодова Ю.И., Горбушин А.Л.; заявитель и патентообладатель ВКА имени А.Ф. Можайского. – № 2019140737; заявл. 09.12.2019; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29. 9 с.

4. Прилуцкий И.К., Казимиров А.В., Молодова Ю.И., Галяев П.О. Передвижные компрессорные станции. Перспективы развития // Компрессорная техника и пневматика. 2019, №1. С. 24 - 30.

5. Жигелей В.С. Основы теории планирования многофакторных испытаний. СПб.: ВИККА имени А.Ф. Можайского, 1994. 109 с.

6. Френкель М.И. Поршневые компрессоры. Теория, конструкции и основы проектирования. Л.: Машиностроение, 1969. 744 с.

7. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.

8. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. М.: Мир, 1976. 406 с.

Помошник Максим Викторович, адъюнкт, pomoshnik97@bk.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Наумчик Игорь Васильевич, канд. техн. наук, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Прилуцкий Игорь Кирович, д-р техн. наук, профессор, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Татаренко Юлия Валентиновна, канд. техн. наук, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

AN EXPERIMENTAL BENCH FOR THE STUDY OF WORKING PROCESSES IN A RECIPROCATING COMPRESSOR AND THE RESULTS OF EXPERIMENTS

M.V. Pomoshnik, I. V. Naumchik, I.K. Prilutsky, Yu.V. Tatarenko

The results of experimental studies of the influence of resonant gas dynamic phenomena in the suction system and the crankshaft rotation frequency on the performance of a reciprocating compressor are presented. For this purpose, an experimental stand has been developed to study the working processes leaking in a reciprocating compressor. A regression equation has been obtained to determine the effect of the rotational speed and length of the suction pipeline on the performance of a reciprocating compressor. It was found that in the selected range of variable variables, according to the results of this multifactorial experiment, the compressor performance depends more on the crankshaft rotation frequency and less on the length of the suction pipeline.

Key words: reciprocating compressor, active multifactorial experiment, work processes, integral parameters, acoustic boost, performance, experimental stand, pipeline length, rotational speeds.

Pomoshnik Maxim Viktorovich, adjunct, pomoshnik97@bk.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Naumchik Igor Vasilyevich, candidate of technical sciences, docent, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Prilutsky Igor Kirovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Tatarenko Yulia Valentinovna, candidate of technical sciences, docent, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky

УДК 621.9.06-52
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-19-20

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКТИВНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ОРГАНЫ ЗАХВАТА И ОРИЕНТИРОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ДИСКОВЫХ БУНКЕРНЫХ ЗАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

С.А. Лукин, А.А. Борисов

В статье представлены некоторые конструкции универсальных механических дисковых бункерных загрузочных устройств для штучных изделий различных форм и этапы разработки конструктивных ограничений на их органы захвата и ориентирования, при которых будет обеспечена надежность их функционирования и максимальная производительность, а также результаты их математического моделирования.

Ключевые слова: гибкость автоматизации загрузки, универсальное бункерное загрузочное устройство, ориентирование изделий, вероятность захвата изделий.

Важнейшей и актуальной задачей в области автоматической загрузки изделий, в частности патронного производства (заготовок, элементов патронов, готовых патронов), на рабочие позиции технологического оборудования линий, осуществляющих операции вытяжки, штамповки, обжима, механической обработки, сборки готовых патронов и их осмотра для контроля качества, является разработка универсальных бункерных загрузочно-ориентирующих устройств (БЗУ) [1, 2]. Это обусловлено тем, что каждое известное БЗУ надежно функционирует только для конкретных заготовок с определенными геометрическими размерами и формой, поэтому при изменении длины, диаметра или других параметров изделий требуется проектирование как новых по размерам захватывающих и ориентирующих органов, так и самих БЗУ, приводящая к существенным материальным и временным затратам [3]. Кроме этого, в связи с выходом новых видов патронов, а для некоторых изделий и технологий их получения, решение данной задачи становится всё более актуальной.

С целью обеспечения высокой производительности и надежности при ориентировании различных видов изделий в БЗУ, при которой выдача из БЗУ неориентированных изделий стремится к нулю, существенного снижения трудоемкости на всех этапах жизненного цикла и осуществления переналадки с одного типаразмера изделия на другой были разработаны некоторые конструкции универсальных БЗУ двух групп – с заменой (рис. 1) или регулировкой (рис. 2) органов захвата и ориентирования.

Универсальное вертикальное БЗУ с профильными роликами, образующими карманы для захвата и ориентирования изделий с отношением длины и диаметра $l / d_1 < 1$ (рис. 1, а), работает следующим образом [4-6]. Правильно сориентированные относительно профиля кармана изделия западают между роликами полностью и перемещаются к зоне выдачи, а неправильно сориентированные заготовки, западая неполностью, опираются боковой поверхностью на профильные ролики и при дальнейшем вращении диска выпадают из кармана.

Универсальное БЗУ с наклонным вращающимся диском и радиальными пазами, переходящими в карманы, предназначено для полуфабрикатов, которые получают новой технологией двухстороннего полугорячего выдавливания (рис. 1, б) [7]. На периферии основания выполнен кольцевой паз, в верхней части которого установлен криволинейный копир с плавно изменяющейся высотой от нулевой величины до максимальной величины. Правильно запавшие в карман полуфабрикаты поднимаются по криволинейному копиру, удерживаются в карманах и выдаются из БЗУ, а неправильно сориентированные полуфабрикаты, поднимаясь по криволинейному копиру, под действием силы тяжести выпадают из карманов обратно в бункер. Универсальность БЗУ с криволинейным копиром достигается заменой криволинейного копира в зависимости от положения центра масс полуфабриката, что позволяет обеспечить его наладку под конкретный типоразмер полуфабрикатов.

В двух рассмотренных конструкциях универсальных БЗУ первой группы реализовано пассивное ориентирование изделий, при котором неправильно захваченные изделия выпадают из БЗУ.

Универсальное БЗУ с регулируемым кольцевым ориентатором, состоящим из двух частей и переориентатором в верхней части бункера (рис. 1, в) способствует снижению трудоемкости его переналадки и повышению производительности за счет переориентирования неправильно захваченных изделий, так как в БЗУ реализуется их активное ориентирование [8]. Изделия, движущиеся к кольцевому ориентатору коническим торцом вперед, западают в него полностью и выдаются из БЗУ; в противном случае изделия западают в карман частично, а в верхней части бункера на переориентаторе приводятся в требуемое положение и выдаются из БЗУ.

Универсальное БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором (рис. 2, г) позволяет загружать стержневые заготовки в форме колпачка различной длины путем регулировки ориентатора по высоте с помощью подпружиненных винтов. Изделия, запавшие в радиальные пазы закрытым основанием вниз, поднимаясь по ориентатору, удерживаются в карманах и выдаются из БЗУ. Изделия, запавшие в карманы открытым основанием вниз, поднимаясь по ориентатору, под действием силы тяжести выпадают из карманов. Таким образом, в данном БЗУ реализовано пассивное ориентирование изделий [9, 10].

Разработанные универсальные БЗУ способствую расширению технических возможностей традиционных БЗУ, повышению надежности функционирования, существенному снижению трудоемкости изготовления, сокращению сроков на переналадку технологического оборудования и тем самым увеличению его производительности.

С целью повышения производительности и надежности универсальных БЗУ возникают задачи обоснования рациональных параметров их захватывающих и ориентирующих органов. При этом захватывающие органы должны обеспечивать захват изделий с высокой вероятностью, способствуя повышению производительности БЗУ, а ориентирующие – надёжное их ориентирование.

В универсальном БЗУ с профильными роликами карман, имеет следующие рекомендуемые параметры в соответствии с расчетной схемой (рис. 2). Расстояния между роликами в верхней и нижней частях превышают диаметры торцов изделия на величину Δ. Угол скоса ролика определяется как $\alpha_р = 90^\circ - \beta$. Высота конической части ролика принимается равной высоте асимметричного торца изделия: $h_р^к = h$. Высота цилиндрической части ролика $h_р^ц$ должна выбираться из условия, при соблюдении которого в карман западут изделия только в требуемом положении. Поэтому при ее конструировании учитывается зазор Δ, как некоторая часть диаметра [11]. Тогда размеры $h_р^ц$ должны находиться в диапазоне $l_1 < h_р^ц < l - 0{,}5\Delta\tan\beta$.

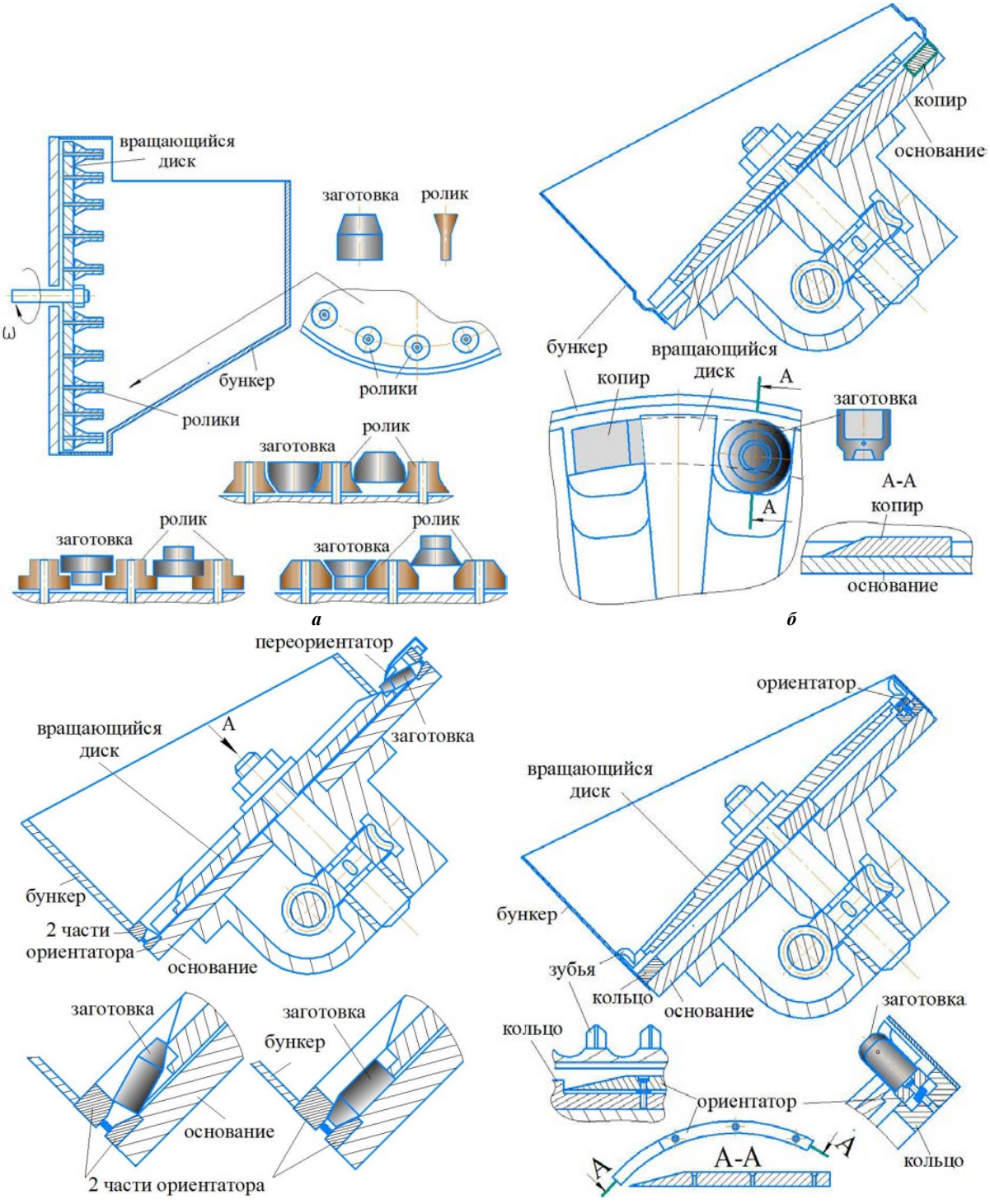


Рис. 1. Универсальные БЗУ с заменой (а, б) и регулировкой (в, г) органов захвата и ориентирования

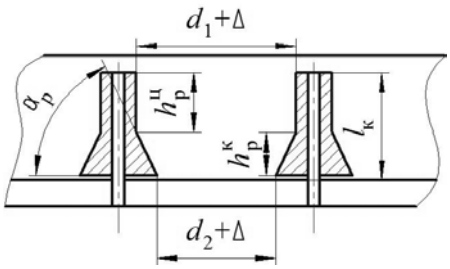


Рис. 2. Расчетные схемы профильных роликов универсального БЗУ

На рис. 3 приведены диапазоны рабочих значений высоты цилиндрической части ролика $h_р^ц$ в выбранных с учетом геометрических особенностей изделий при различных значениях коэффициента $a = d_1/l$ и длины l. Высота цилиндрической части ролика должна находиться в рабочей зоне, верхняя граница которой описана длиной $h_{р\,max}^ц$, одинаковой для всех изделий при указанном значении длины, а нижняя – $h_{р\,min}^ц$ определяется в зависимости от a.

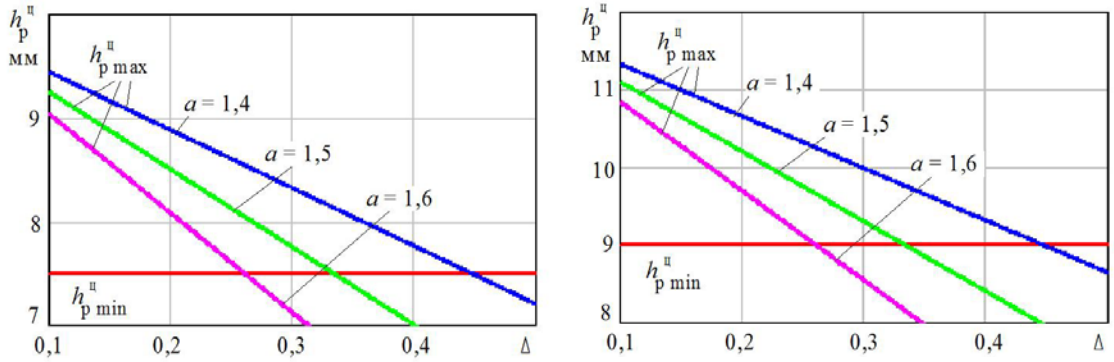
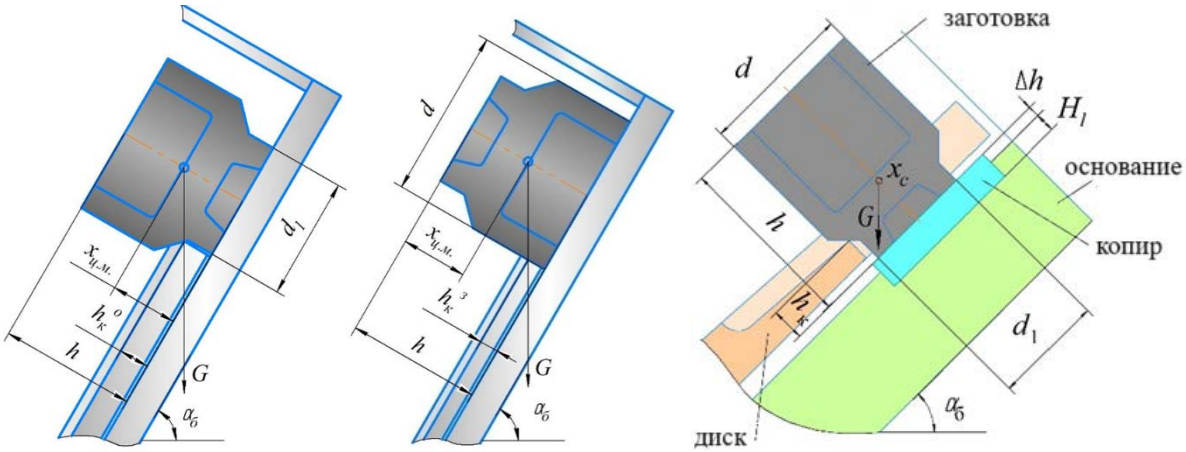


Рис. 3. Результаты математического моделирования высоты $h_р^ц$
для изделий с различными a ***при*** $l = 10$ ***мм (а) и*** $l = 12$ ***мм (а)***

В универсальном БЗУ с криволинейным копиром расчетные схемы для определения конструктивных ограничений представлены на рис. 4. Глубина кольцевого паза принимается из условия $H \le 0{,}5d$, а ширина паза равна длине кармана $a = l_к$. Рабочая зона (рис. 5) должна соответствовать условию $h_к^з \le h_к < h_к^o$. Соблюдение данного условия позволит реализовать процессы захвата и ориентирования полуфабрикатов. Графики позволят определить рабочую зону для реализации процессов захвата и ориентирования при наклоне бункера $\alpha_б$ от 45° до 55° [12, 13].



$$h_к^o = h - x_c - \frac{d}{2}\cdot tg(\alpha_б) \qquad h_к^з = x_c - \frac{d_1}{2}\cdot ctg(\alpha_б)$$

Рис. 4. Расчетные схемы по захвату и ориентированию универсального БЗУ с криволинейным копиром

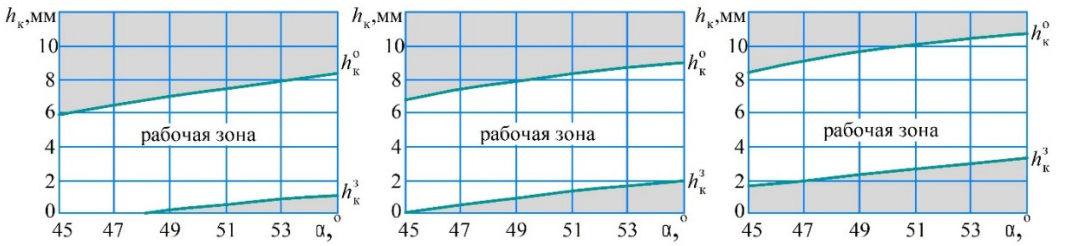


Рис. 5. Графики зависимостей высоты кармана от угла наклона бункера при h/d***: 1,2 (а); 1,35 (б) и 1,5 (в)***

При проектировании БЗУ необходимо определить для различных полуфабрикатов конструктивный размер Δh. При наклоне бункера $\alpha_б = 45°$ для полуфабрикатов с $h/d = 1{,}1$ Δh = 3,2 мм, для полуфабрикатов с $h/d = 1{,}2$ Δh = 3,25 мм, для полуфабрикатов с $h/d = 1{,}35$ Δh = 3,3 мм, для полуфабрикатов с $h/d = 1{,}5$ Δh = 3,4 мм.

Конструктивный размер Δh копира будет иметь вид

$$\Delta h = \frac{2d \cdot 2a - 4x_c - d \cdot 2tg(\alpha_б) + d_1 \cdot 2ctg(\alpha_б)}{4}.$$

На рис. 6 представлены расчетные схемы, с помощью которых разработаны диапазоны значений конструктивных параметров карманов и регулируемого ориентатора универсального БЗУ с зубьями и регулируемым ориентатором. Рекомендуется выбирать ширину кармана в диапазоне $1{,}1d_1 \le h_k < 1{,}6d_1$ при условии, что $l < 1{,}6d_1$. Длина l_k кармана в зоне ориентирования должна быть выбрана таким образом, чтобы изделие, запавшее в карман в неправильном положении (открытым торцом), смогло выпасть из кармана, опрокидываясь на краю кармана, поэтому $l_k > \sqrt{d_1^2 + H^2}$ [14].

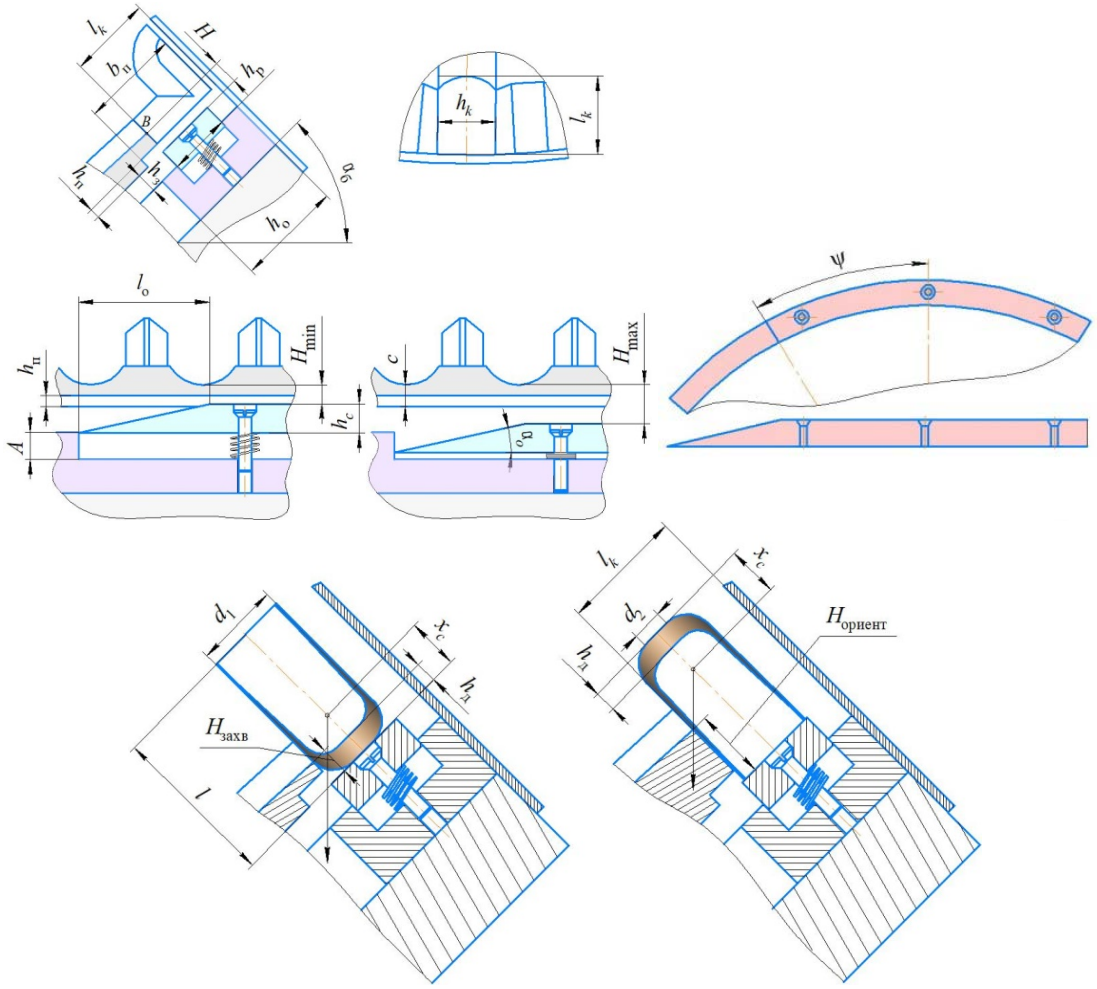


Рис. 6. Расчетные схемы для разработки ограничений на параметры захватывающих и ориентирующих органов с регулировкой

Высота кармана – в диапазоне $H_{\text{захв}} \le H \le H_{\text{ориент}}$ или, описав условия захвата и ориентирования с помощью расчетной схемы, получим

$$l - x_c - 0{,}5d_1\text{ctg}\alpha_б \ge H \ge x_c - 0{,}5d_1\text{ctg}\alpha_б,$$

где $\alpha_б$ – угол наклона вращающегося диска БЗУ.

Верхний участок кольцевого ориентатора должен начинаться не позднее угла ψ, при котором начнется пассивное ориентирование неправильно запавших в карман изделий.

Выполнив расчеты, получили

$$\psi = \arcsin\frac{-\mu A + \sqrt{\mu^2 + 1 - A^2}}{\mu^2 + 1},$$

где

$$A = \frac{\cos\alpha_б}{\sin\alpha_б} \cdot \frac{1 - \dfrac{l^A_{G_1}}{l^A_{N_2} + \mu \cdot H} - \dfrac{l^B_{G_1} \cdot (\sin\alpha_1 - \mu\cos\alpha_1)}{l^B_{N_1}}}{\dfrac{l^B_{G_2} \cdot (\sin\alpha_1 - \mu\cos\alpha_1)}{l^B_{N_1}} - \dfrac{l^A_{G_2}}{l^A_{N_2} + \mu \cdot H}}.$$

На рис. 7 представлены результаты математического моделирования высоты кармана при различных соотношениях $f = \dfrac{x_c}{l}$ и длины кармана в зависимости от его высоты для гильз ПСО 5,45х39 и 7,62х39.

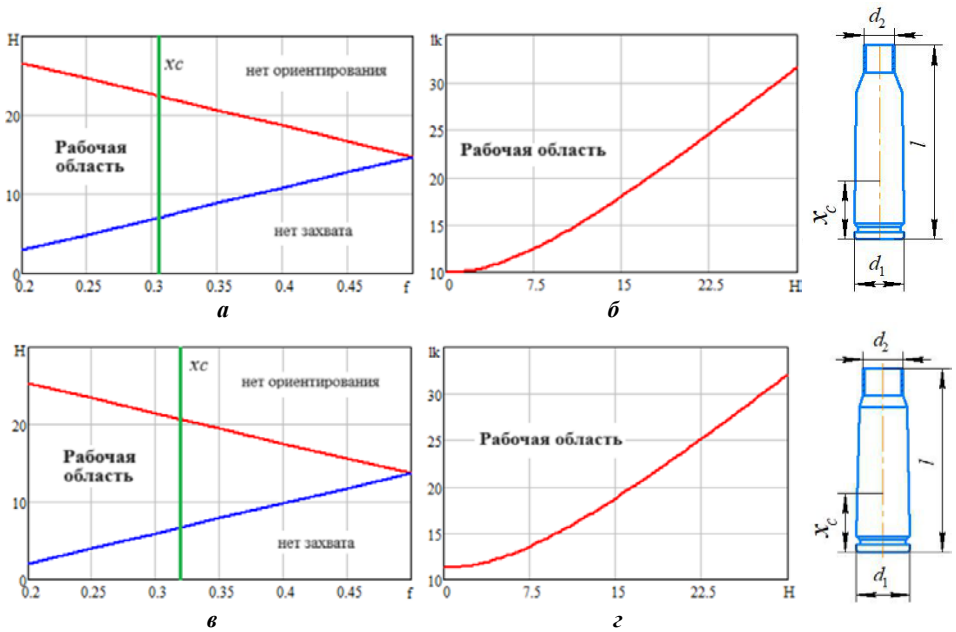


Рис. 7. Результаты математического моделирования для гильз 5,45х39 (а, б), 7,62х39 (в, г) высоты H кармана (а, в) (в мм) при различных соотношениях f и длины $l_к$ кармана (б, г) (в мм) в зависимости от его высоты H (в мм)

Разработанные конструктивные ограничения позволят обеспечить надежное функционирование универсальных БЗУ с требуемой производительностью при загрузке различного технологического оборудования автоматизированных линий, в том числе роторного типа, изделиями тел вращения широкой номенклатуры.

Список литературы

1. Пантюхина Е.В., Васин С.А., Шевченко С.Н., Лукин С.А. Механические дисковые бункерные загрузочные устройства для патронов и их элементов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. № 3 (119). С. 110-116.

2. Пантюхина Е.В., Васин С.А., Шевченко С.Н., Лукин С.А. Механические дисковые бункерные загрузочные устройства для патронов и их элементов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. № 3 (119). С. 110-116.

3. Пантюхина Е.В., Васин С.А., Шевченко С.Н., Лукин С.А. Повышение надежности и производительности дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств для асимметричных деталей тел вращения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 26, № 2, 2024. С. 110–116.

4. Пантюхина Е.В., Прейс В.В., Пузиков И.В., Дьякова Э.В. Результаты теоретического и экспериментального исследования вертикального бункерного загрузочного устройства с роликами для плоских и близких к равноразмерным деталям с неявной асимметрией // В сборнике: Проблемы машиноведения. Материалы V Международной научно-технической конференции. Омск, 2021. С. 377-386.

5. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Puzikov I.V., Dyakova E.V. Results of a theoretical and experimental research of a vertical hopper-feeding device with rollers for flat and close-to-equal-sized parts with implicit asymmetry // Journal of Physics: Conference Series. 5. Сер. "V International Scientific and Technical Conference "Mechanical Science and Technology Update", MSTU 2021" 2021. С. 012017.

6. Патент на полезную модель 170000 РФ Российская Федерация. МПК B23Q 7/02. Вертикальное бункерное загрузочное устройство / Давыдова Е.В., Прейс В.В., Чурочкин А.В. № 2016121520 от 31.05.2016; опубл. 11.04.2017.

7. Патент на полезную модель 216181 РФ Российская Федерация. МПК B23Q 7/02. Бункерное загрузочно-ориентирующее устройство для объемных заготовок с асимметрией по торцам / В.В. Прейс, Е.В. Пантюхина, Э.В. Дьякова. № 2022130598 от 23.11.2022; опубл. 20.01.2023.

8. Патент на полезную модель 220505 РФ Российская Федерация. МПК B23Q 7/02. Бункерное загрузочное устройство для цилиндрических заготовок с цилиндрической формой одного из торцов и конической формой другого / В.В. Прейс, Е.В. Пантюхина, И.В. Пузиков. № 2023108055 от 30.03.2023.; опубл. 18.09.2023, Бюл. № 26.

9. Пантюхина Е.В., Лукин С.А., Васин С.А. Разработка универсальной конструкции механического дискового бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором для заготовок тел вращения в форме колпачка // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (95). С. 43-49.

10. Пантюхина Е.В., Лукин С.А., Васин С.А. Методика проектирования универсального механического дискового бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором для заготовок тел вращения в форме колпачка // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2024. № 3 (95). С. 28-35.

11. Васин С.А., Пантюхина Е.В. Разработка конструктивных ограничений на параметры усовершенствованных дисковых бункерных загрузочных устройств для деталей с неявной асимметрией // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 2 (90). С. 146-154.

12. Дьякова Э.В., Пантюхина Е.В. Конструктивные ограничения на параметры бункерного загрузочного устройства для полуфабрикатов двухстороннего выдавливания// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 4. С. 65-69.

13. Дьякова Э.В., Пантюхина Е.В. Разработка конструктивных ограничений на параметры захватывающих и ориентирующих органов дискового бункерного загрузочного устройства для асимметричных деталей, близких к равноразмерным // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. Санкт-Петербург: НИЦ МС. 2023. № 20. С. 125-130.

14. Лукин С.А., Пантюхина Е.В. Разработка и математическое моделирование конструктивных ограничений на органы захвата и ориентирования бункерного загрузочного устройства с зубьями и регулируемым ориентатором // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 98-103.

Лукин Сергей Анатольевич, генеральный директор, tpz@tulammo.ru, Россия, Тула, АО «Тульский патронный завод»,

Борисов Александр Александрович, заместитель начальника отдела – начальник лаборатории научно-исследовательского испытательного отдела, boris912@mail.ru, Россия, Нижегородская область, ФГБУ «3 ЦНИИ» Минобороны России

PECULIARITIES OF DEVELOPMENT OF STRUCTURAL LIMITATIONS ON GRIPPING AND ORIENTING ELEMENTS OF UNIVERSAL MECHANICAL DISK HOPPER FEEDERS

S.A. Lukin, A.A. Borisov

The article presents some designs of universal mechanical disk hopper feeders for piece products of various shapes and the stages of development of design restrictions on their gripping and orienting organs, at which reliability of their functioning and maximum feed rate will be ensured, as well as the results of their mathematical modeling.

Key words: flexibility of feeding automation, universal hopper feeding device, orientation of products, probability of products capture.

Lukin Sergey Anatolyevich, general director, tpz@tulammo.ru, Russia, Tula, JSC «Tula Cartridge Plant»,

Borisov Alexander Alexandrovich, deputy head of the department - head of the laboratory of the research testing department, boris912@mail.ru, Russia, Nizhny Novgorod Region, FSBI "3 Central Research Institute" of the Ministry of Defense of Russia

УДК 629.7.08
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-25-26

СПОСОБ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СПЛАЙНОВ

А.М. Астанков, А.В. Ляшевский, М.В. Помошник

Рассматривается способ определения сроков контроля технического состояния систем (агрегатов) из состава технологического оборудования наземной космической инфраструктуры по данным мониторинга их текущего технического состояния с использованием методов неразрушающего контроля. В статье предложен способ анализа трендов соседних реализаций достижения предельного состояния объектом контроля по заданным критериям работоспособности путем построения линейных сплайнов.

Ключевые слова: техническое состояние, критичные элементы, линейный сплайн, неразрушающий контроль, безопасная эксплуатация, технологическое оборудование.

Значительная часть элементов технологического оборудования (ТО) наземной космической инфраструктуры (НКИ) представляет собой уникальные и сложные с точки зрения изготовления и эксплуатации изделия. Каждое изделие выполняет определенные функции и вносит свой вклад в достижение основной цели – обеспечение запуска космического аппарата (КА).

Ряд элементов ТО условно можно выделить в отдельную категорию – критичные элементы. Под критичными элементами следует понимать элементы ТО, отказ которых приводит к переносу или отмене запуска КА и вынужденным простоям, не позволяющим обеспечить выполнение графика запусков КА[1].

Контроль технического состояния (ТС) критичных систем (агрегатов) может осуществляться как встроенными средствами, так и с использованием методов и средств неразрушающего контроля (НК).

Несмотря на значительный объем научных работ в области НК ТС, вопросы обоснования частоты его проведения исследованы недостаточно. Как правило, НК ТС проводят при техническом обслуживании большой периодичности или осуществлении комплекса мероприятий по продлению назначенных показателей ТО НКИ [2, 12].

Для обоснования частоты проведения НК на ТО НКИ предлагается использовать результаты прогнозирования достижения предельного состояния по установленному критерию, в частности выход значения параметра, контролируемого средствами НК, за допустимые пределы. Данное предложение основано на идеях гарантированного прогноза [3-7] при построении линейных сплайнов соседних реализаций снижение работоспособности объектом контроля (ОК). Предложенный подход определения сроков контроля ТС систем (агрегатов) позволяет эксплуатировать систему до появления признаков критического снижения ресурса и исключает преждевременную замену ее типовых элементов и узлов [8].

В настоящем исследовании рассматривается периодический контроль ТС критичных систем, проводимый с целью своевременного вывода их на техническое обслуживание по фактическому ТС для предотвращения отказа, запас работоспособности или технического ресурса, который убывает при эксплуатации по линейному или экспоненциальному закону. Линейная модель износа применяется для описания кинетики разрушения металлов при общей коррозии и различных видах механического изнашивания (при трении, гидро- и газоабразивной эрозии). Экспоненциальная модель износа применяется при описании кинетики общей коррозии под напряжением и является ограничением предлагаемого подхода.

Основные положения. Согласно ГОСТ Р 27.102-2021 для оценки долговечности технической системы используется показатель – гамма-процентный ресурс, определяющий наработку оборудования, при которой оно не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ. При $\gamma = 100$ % гамма-процентный ресурс Tp_γ соответствует назначенному ресурсу (наработке до предельного состояния), который определяется как

$$1 - \int_0^{T_{p\gamma}} f(t)dt = \frac{\gamma}{100},$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки до предельного состояния (отказа).

Назначенный ресурс устанавливают в соответствии со значениями показателей надежности, которые рассчитывают (или получают эмпирически) с учетом требований по готовности, ресурсоемкости и т.д. При этом вероятность безотказной работы системы должна стремиться к единице. Кроме того, для повышения вероятности безотказной работы часто вводят понижающий коэффициент предельной наработки оборудования или выбирают комплексные показатели надежности, поэтому назначенный показатель ресурса не является предельным, а определяет минимальную наработку, при которой система может снизить работоспособность. Предполагается, что эксплуатация системы до назначенной суммарной наработки не приведет к выходу ее из строя, однако это не является гарантией от внезапного отказа критичной системы, поэтому периодический контроль параметров таких систем является актуальной задачей.

Учитывая приведенные положения, выберем оптимальную модель для определения сроков контроля текущего ТС критичных систем с точки зрения технической и экономической целесообразности.

Пусть Tp_γ известно, а запас ресурса системы убывает при эксплуатации по линейному или экспоненциальному закону с учетом ограничений, то есть дефектов, развитие которых линейно связано со значением параметров, контролируемых средствами НК.

Рассмотрим одномерный случай функционирования ОК, когда его ТС определяется одним измеряемым параметром контроля (ПК). Заметим, что решение задач для многомерного случая, когда у ОК несколько критичных ПК, сводится к решению совокупности одномерных.

Пусть $d(t_i)$ – значение ПК при i-ой наработке оборудования, тогда $\Delta d(t_i) = d(t_i) - d(t_0) - i$-е отклонение значения ПК от исходного значения (при нулевой наработке: $t_0 = 0$). Полагая $d(t_0) = 0$, можно записать: $\Delta d(t_i) = d(t_i)$, а $\Delta d(T_p) = d(T_p) - d(t_0) = d(T_p)$ – установленное критическое значение отклонения ПК при наработке до предельного состояния T_p (назначенного ресурса).

На рис. 1 графически представлено снижение работоспособности ОК.

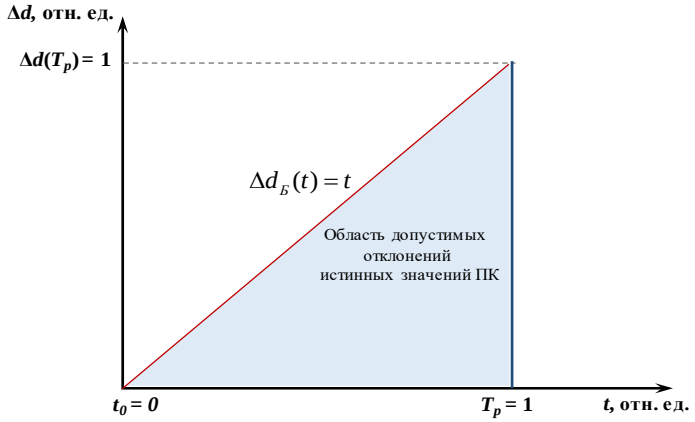


Рис. 1. Снижение работоспособности объектом контроля при условии линеаризации процесса износа

Назовем прямую $\Delta d_Б(t) = t$ базовой линией снижения работоспособности (БЛПР), а область ниже БЛПР областью допустимых отклонений истинных значений ПК от исходного состояния, так как истинное значение отклонения ПК (плановый износ) от исходного состояния при штатной эксплуатации ТО в любой момент наработки t_i не должно превышать $\Delta d_Б(t_i)$.

$$t_i = \frac{t_i'}{t_{\max}'} = \frac{t_i'}{T_p'}, \tag{1}$$

$$\Delta d(t_i) = \frac{d(t_i')}{d(t_{\max}')} = \frac{d(t_i')}{d(T_p')}, \tag{2}$$

где t_i' – действительное i-е значение наработки во временных единицах; $t_{\max}' = T_p'$ – действительное максимальное (предельное) значение наработки во временных единицах; $d(t_i')$ – действительное отклонение ПК оборудования от исходного значения при наработке t_i'; $d(t_{\max}') = d(T_p')$ – действительное максимальное(предельное) отклонение ПК оборудования от исходного значения при наработке T_p'.

На рис.1 производная линии снижения работоспособности оборудования равна единице, поскольку шкала времени наработки и шкала отклонения ПК оборудования от исходного значения были нормализованы в соответствии с выражениями (1) и (2). Новые нормализованные значения t_i и $\Delta d(t_i)$ будут лежать в интервале [0, 1].Отметим, что такое нормализованное представление данных применимо и удобно, когда измерения ПК производятся разными методами НК и показатели отклонений ПК от исходных значений имеют отличную размерность. Нормализация позволяет привести данные к безразмерному виду, что обеспечивает их сравнение между собой и способствует расширенному анализу ТС ОК.

Динамику приближения ТС ОК к предельному состоянию удобно описывать кусочными функциями или сплайнами, когда процесс сниженияработоспособности объектом задается отрезком некоторой прямой (рис. 2), т.е. процесс изменения $\Delta d(t_i)$ аппроксимируется случайными функциями вида:

$$\Delta d_{ij}(t_i) = b_{ij} + a_{ij} \cdot t_i + \varepsilon_{ij}, \quad j = \{1, 2, ..., n\}, \quad n \to \infty,$$

где $\Delta d_{ij}(t_i)$ – j-я реализация процесса изменения ПР в момент наработки t_i; b_{ij} – свободный член j-го сплайна в момент наработки t_i;a_{ij} – коэффициент, определяющий тангенс угла наклона j-го сплайна к оси абсцисс в момент наработки t_i;ε_{ij} – случайная ошибка i-го измерения в момент наработки t_i, которая не превышает по модулю некоторой заданной величины e ($|\varepsilon_{ij}| \le e$).

В работе [9] описывается минимаксный подход к определению ТС ОК для его дальнейшего прогнозирования. Основная идея данного подхода заключается в том, что в ходе измерения показателей текущего ТС ОК в определенные моменты времени из множества возможных реализаций случайного процесса износа его типовых элементов и узлов выбираются экстремальные реализации. Истинные значения изменения ПК при этом неизвестны, но они гарантированно находятся между экстремальными реализациями $\Delta d(t_i)^-$ и $\Delta d(t_i)^+$:

$$\begin{cases} \Delta d(t_i)^- = b_i + a_i \cdot t_i - e, \\ \Delta d(t_i)^+ = b_i + a_i \cdot t_i + e, \\ \Delta d(t_i)^- < \Delta d_{\text{ист}}(t_i) < \Delta d(t_i)^+, \end{cases}$$

где $\Delta d(t_i)$ – результат изменения (снижениянаработоспособности относительно исходного состояния) ПК в момент наработки t_i;$\Delta d_{\text{ист}}(t_i)$ – истинное значение изменения ПК в момент наработки t_i.

Для решения задачи рассматриваются реализации, характеризующие только негативное развитие процесса отклонения ПК оборудования от исходного состояния ($\Delta d(t_i)^+$).

Проведем измерение ПК в момент наработки t_i и найдем экстремальное значение его изменения $\Delta d(t_i)^+$. Далее определим коэффициент a_i и свободный член b_i, решая систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta d(t_i)^+ = b_i + a_i \cdot t_i + e, \\ \Delta d(t_{i-1})^+ = b_{i-1} + a_{i-1} \cdot t_{i-1} + e. \end{cases}$$

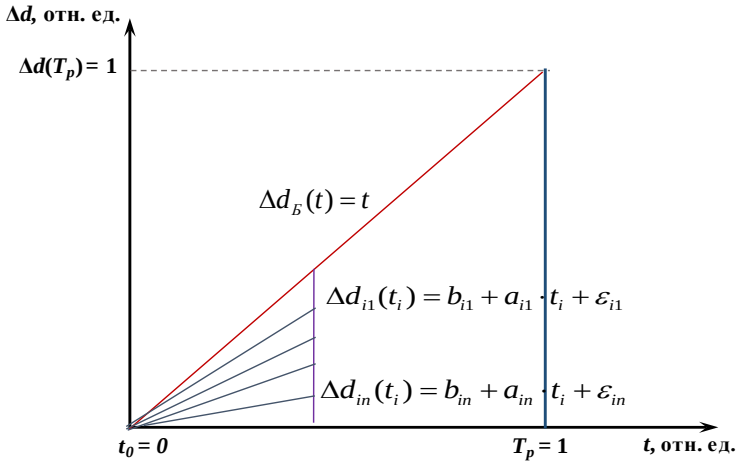


Рис. 2. Износ технологическогооборудования в определенные моменты наработки

Выбор первой точки $t_1 = T_н$ измерения ПК следует проводить, руководствуясь статистическими данными, или в соответствии с рекомендациями проектной документации на ОК. Одним из критериев такого выбора должно быть условие возможности выявления средствами контроля начальной стадии развития дефекта у ОК, которое зависит от технических характеристик измерительных средств НК, главным образом – от их чувствительности.

Коэффициент a_i определяет угол наклона линейного сплайна к оси абсцисс в момент t_i, а значит и тенденцию изменения ПК, поэтому срок проведения НК текущего ТС ОК t_{i+1} можно определять по соотношению коэффициентов *ai*-го сплайна и БЛПР (в данном случае $a_{БЛПР} = const = 1$)

$$t_{i+1} = t_i + T_н \cdot \frac{1}{|a_i|}. \qquad (3)$$

Из формулы (3) следует, что второй член суммы отношение $\frac{T_н}{|a_i|}$ определяет наработку до следующего измерения ПК. При этом, чем меньше коэффициент a_i в уравнении предыдущего сплайна (тенденция значений ПК направлена в сторону отдаления от значений БЛРП), тем больше планируемый период наработки до проведения очередного контроля ТС объекта, и наоборот. Данное обстоятельство позволяет более рационально планировать проведение контроля объектов, а также более эффективно организовывать техническое обслуживаниена них.

Приведем пример расчета очередных моментов измерения ПК системы при условии, что оборудование работает без запланированных или вынужденных простоев, процесс деградации ПК протекает естественно, экстремальные реализации ($\Delta d(t_i)^+$) лежат в области допустимых отклонений истинных значений ПК от исходного состояния в процессе всего периода эксплуатации [0, T_p] (таблица, рис. 3).

Результаты расчета моментов измерения ПК

Время	t по выражению (3)	$\Delta d(t_i)^+$	Уравнение сплайна	a_i	$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$
$t_1 = T_н$	0,0100	0,005	$\Delta d(t)^+ = 0{,}5000t$	0,5000	0,0100
t_2	0,2100	0,100	$\Delta d(t)^+ = 0{,}4750t + 0{,}0002$	0,4750	0,2000
t_3	0,4205	0,300	$\Delta d(t)^+ = 0{,}9500t - 0{,}0995$	0,9500	0,2105
t_4	0,5258	0,350	$\Delta d(t)^+ = 0{,}4750t + 0{,}1003$	0,4750	0,1053
t_5	0,7363	0,550	$\Delta d(t)^+ = 0{,}9500t - 0{,}1495$	0,9500	0,2105
t_6	0,8416	0,700	$\Delta d(t)^+ = 1{,}4250t - 0{,}4992$	1,4250	0,1053
t_7	0,9117	0,750	$\Delta d(t)^+ = 0{,}7125t + 0{,}1004$	0,7125	0,0702
t_8	$1{,}0521 > 1 \Rightarrow t_8 = 1$	0,810	$\Delta d(t)^+ = 0{,}6799t + 0{,}1301$	0,6799	0,0882

На практике ТО эксплуатируется, как правило, с запланированными или вынужденными простоями [10]. Пусть T_j– момент начала простоя ($t_i \le T_j$), T_{j+1} – момент окончания простоя, t'_{i+1} – момент очередного контроля ТС объекта в отсутствии простоя. Таким образом, выражение (3) можно преобразовать к следующему виду:

$$\begin{cases} t_{i+1} = t'_{i+1} + \sum_{j=1}^{2n} \left(T_{j+1} - T_j\right), if \quad t'_{i+1} > T_{2n}, \\ t_{i+1} = T_{2n}, if \quad t'_{i+1} \le T_{2n}, \end{cases} \qquad (4)$$

где n – количество простоев с момента t_i.

Следует отметить, что если во время простоя процесс износа элемента оборудования продолжается, то в данном случае формула (4) несправедлива, для расчета t_{i+1} следует использовать формулу (3).

Принятие решений по проведению технического обслуживания критичных систем целесообразно проводить, анализируя тренды двух последних сплайнов относительно БЛПР в соответствии с условиями:

$$\begin{cases} a_i > a_{БЛПР_i}, \\ a_{i-1} > a_{БЛПР_{i-1}}, \\ \Delta d(t_i) > \Delta d_Б(t_i), \\ \Delta d(t_{i-1}) > \Delta d_Б(t_{i-1}). \end{cases}$$

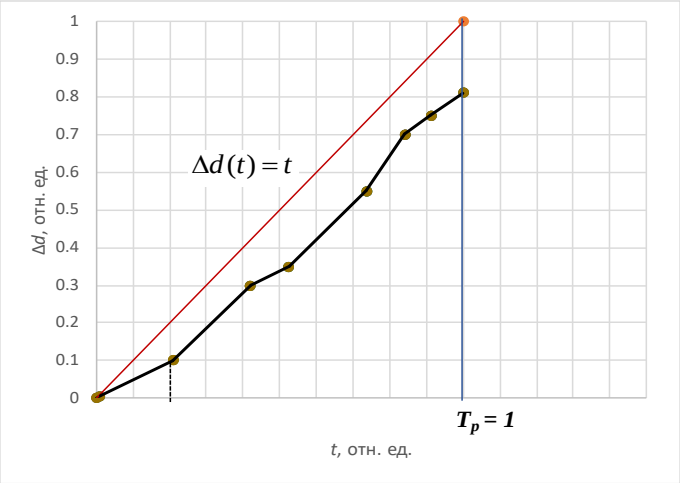


Рис. 3. Условный расчет моментов измерения ПК

Таким образом, если углы наклона к оси абсцисс (коэффициенты a_i и a_{i-1}) больше, чем у БЛПР, и при этом крайние правые точки сплайнов находятся выше БЛПР (точки А и Б на рис. 4), то такое отклонение от нормального (линейного износа) позволяет предположить, что начался процесс повышенной снижения работоспособности у ОК, поскольку возрастает вероятность выхода истинного значения ПК из области допустимых значений. Следовательно,наступает время принятия решения по управлению дальнейшей эксплуатацией.

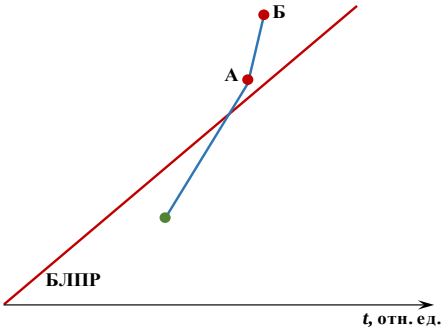


Рис. 4. Тренд двух последних сплайнов относительно БЛПР

В ситуации, когда сплайн пересекает БЛПР, срок(начало) проведения очередного контроля ТС объекта, рассчитанный по формуле (3), будет относительно невелик.Это позволяет минимизировать риски перехода ОК в неработоспособное состояние. Кроме того, вероятность наступления такого рискового события минимизируется и тем, что в представленной модели рассматривается негативное развитие процесса отклонения ПК от исходного состояния. Учитывая обстоятельство, что оборудование критичных систем в большей мере является уникальным, дорогим, высокотехнологичным и при этом с высокой ценой отказа, стратегия контроля его ТС должна строиться на принципе избыточности мер (или запаса надежности) по предотвращению рисковых событий и носить упреждающий характер.

После восстановления ПК (приведения их к номинальным значениям для соответствующей наработки) можно далее прогнозировать периодичность неразрушающего контроля технического состояния ТО НКИ в соответствии с предложенным способом.

Если в процессе эксплуатации оборудования какой-либо элемент подвержен износу по экспоненциальному закону, то есть запас работоспособности оборудования уменьшается нелинейно $\Delta d(t) = x \cdot e^{at}$, где $x = const$, получаем $\ln \Delta d(t) = \ln x + at$.

Пусть $b = \ln x$, тогда можно записать переход к линейной зависимости вида:

$$\ln \Delta d(t) = b + at.$$

Важным вопросом при определении экстремальных реализаций $\Delta d(t_i)^+$ и $\Delta d(t_i)^-$ является наиболее точное и обоснованное указание значения величины e, которая задает максимальный интервал, в котором находятся ошибки измерений ПК, то есть определяет расстояние между граничными реализациями снижения запаса работоспособности ТО при его эксплуатации. Следовательно, чем меньше это расстояние, тем точнее будет оценка ТС ОК.

Число *e* составляет половину ширины максимального интервала, в котором истинное значение находится с заданной достоверностью, и называется предельной доверительной погрешностью. В общем случае предельная доверительная погрешность является половинной суммы максимальной систематической погрешности измерения ($\delta_{сист}$) и максимальной случайной погрешности измерения ($\delta_{случ}$):

$$e = \frac{\max(\delta_{сист}) + \max(\delta_{случ})}{2}.$$

На практике причины систематических погрешностей измерения обычно известны, их стараются учесть или максимально устранить путем детального анализа потенциальных источников и тщательной подготовкой к проведению измерений.

Случайная погрешность измерения может быть вычислена статистическими методами по результатам тестовых измерений [11]:

$$\delta_{случ} = t_{p,n} \cdot S_{\bar{x}},$$

где t – коэффициент Стьюдента;p – доверительная вероятность (надёжность) оценки;n – число измерений; $S_{\bar{x}}$ – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического.

Заключение. Таким образом, предложен способ прогнозирования периодичности НК технического состояния ТО НКИ на основе построения линейных сплайнов. Полученные решения базируются на идее аппроксимации линейными сплайнами соседних реализаций достижения предельного состояния ОК. Общая схема принятия решения заключается в анализе изменений каждого из ПК элементов системы при построении линейных сплайнов. В результате анализа этого изменения определяются периодичности проведения очередных контрольных измерений ПК.

Своевременный контроль текущего ТС критичных элементов ТО НКИ на основе разработанного способа позволяет существенно снизить риски внезапных отказов в процессе эксплуатации. Данный подход к планированию сроков проведения НК, целесообразно использовать для критичных элементов ТО после продления их назначенных показателей.

Список источников

1. ГОСТ 27.310-95 Анализ видов, последствий и критичности отказов. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 1997. 14 с.

2. Головчинский В.О., Головчинская Н.В., Мироненков О.В. Планирование диагностических мероприятий и технического обслуживания на объектах наземной космической инфраструктуры методом построения линейных сплайнов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2023. № 686. С. 165-172.

3. Абрамов О.В. Об оценке вероятности наступления рискового события: функционально-параметрический подход // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1. С. 24-31.

4. Абрамов О.В. Функционально-параметрическое направление теории рисков: возможности и перспективы // Вестник ДВО РАН. 2016. № 4. С. 96-101.

5. Абрамов О.В. Анализ и прогнозирование техногенных рисков // Информатика и системы управления. 2012. № 3. С. 97-105.

6. Абрамов О.В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения // Информатика и системы управления. 2011. № 2 (28). С. 4-15.

7. Абрамов О.В. Управление состоянием сложных технических систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2010. Т. 1. С. 24-26.

8. Ащепков Л.Т. Модели и методы повышения живучести управляемых систем. Владивосток: Дальнаука, 2006.

9. Абрамов О.В., Розенбаум А.Н., Климченко В.В. Прогнозирование состояния и планирование эксплуатации систем ответственного назначения // Вестник ДВО РАН. 1996. № 4. С. 65-76.

10. Абрамов О.В., Цициашвили Г.Ш. Прогнозирование отказа контролируемой технической системы // Информатика и системы управления. 2018. №3(57). С. 42-49.

11. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М: Высш. шк., 2005. 478 с.

12. Астанков А.М., Шифф В.К., Вагин А.В. Повышение безопасности работы насосных агрегатов заправочного оборудования стартовых комплексов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2018. №. 4. С. 6-15.

Ляшевский Александр Валерьевич, канд. техн. наук, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Астанков Алексей Михайлович, начальник лаборатории, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Помошник Максим Викторович, адъюнкт, pomoshnik97@bk.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

A METHOD FOR PREDICTING THE FREQUENCY OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THE TECHNICAL CONDITION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE BASED ON THE CONSTRUCTION OF LINEAR SPLINES

A.M. Astankov, A.V. Lyashevsky, M.V. Assistant

A method for determining the timing of monitoring the technical condition of systems (aggregates) from the technological equipment of the ground-based space infrastructure based on monitoring data of their current technical condition

using non-destructive testing methods is considered. The article proposes a method for analyzing trends in neighboring implementations of reaching the limit state by the object of control according to the given performance criteria by constructing linear splines.

Key words: technical condition, critical elements, linear spline, non-destructive testing, safe operation, technological equipment.

Lyashevsky Alexander Valeryevich, candidate of technical sciences, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Astankov Alexey Mikhailovich, head of the laboratory, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Pomoshnik Maxim Viktorovich, adjunct, pomoshnik97@bk.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky

УДК 622.23.05
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-30-31

КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИЗИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА НА ПРИМЕРЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МОЛОТКОВ

А.Н. Дроздов, Е.Р. Белкина

В статье представлена динамическая модель ручного гидравлического молотка, описывающего движения ударника-корпуса-рукояти-золотника. Обоснован выбор эффективного решения математической модели с помощью компьютерной системы MathCad. В результате его применения реализовано решение упрощенного варианта математической модели, позволившего получить характеристики движения ударника необходимые для оценки энергии единичного удара.

Ключевые слова: гидравлический молоток, математическая модель, динамическая схема, механизированный инструмент.

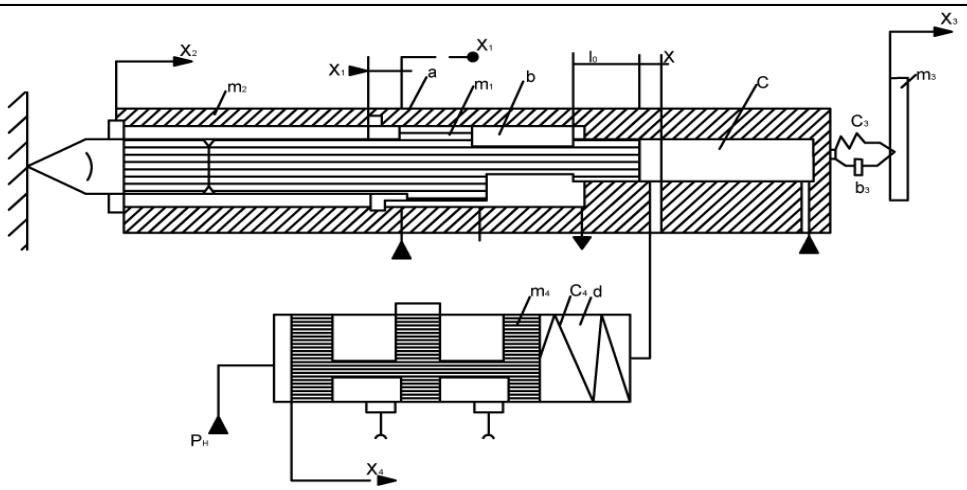
Гидрообъемный привод в настоящее время получил широкое применение в строительной технике. В значительной мере это относится к рабочему оборудованию строительных машин и в первую очередь универсальным: одноковшовым экскаваторам, фронтальным погрузчикам, оснащаемых разнообразным комплектом сменных рабочих органов с предусмотренной возможностью подключения различных видов механизированного инструмента: молотков, ломов, перфораторов, гайковертов и др. Все виды гидроинструмента могут получать питание также и от переносных малогабаритных гидростанций с портативным источником питания в виде дизельных или бензиновых двигателей. Широкое развитие указанных источников питания предопределило закрепление на рынке механизированного инструмента гидравлических ручных машин, обладающих рядом известных преимуществ перед пневматическими. Это определило развитие научно-обоснованного подхода к созданию и разработке различных видов гидравлической техники с разработкой математических моделей и методов их решения. Выбор эффективного метода решения является важным этапом всей разработки, позволяющим проводить анализ получаемых результатов. Практика применения интегрированной математической системы Mathcad для решения различных технико-экономических задач, применительно к различным видам строительной техники, длительное время применяется на кафедре «Механизации, автоматизации и роботизации строительства» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) и показала удобство и эффективность [1-8]. Этим обусловлен его выбор для решения поставленной задачи.

На рис. 1 представлена динамическая схема гидромолотка. Здесь $m_{1,\,2,\,3,\,4}$ – массы соответственно ударника (1), корпуса (2), рукояти (3), золотника (4); $P_{\text{н}}$ – давление в напорной магистрали; c_3, b_3 – коэффициенты соответственно жесткости и вязкого трения амортизирующего устройства рукояти; c_4 – коэффициент жесткости пружины гидрораспределителя; $x, \dot{x}, \ddot{x}$ с индексами 1, 2, 3, 4 – соответственно перемещение, скорость, ускорение ударника, корпуса, рукояти и золотника; x_{10} – предварительная величина поджатия упругих элементов ударника.

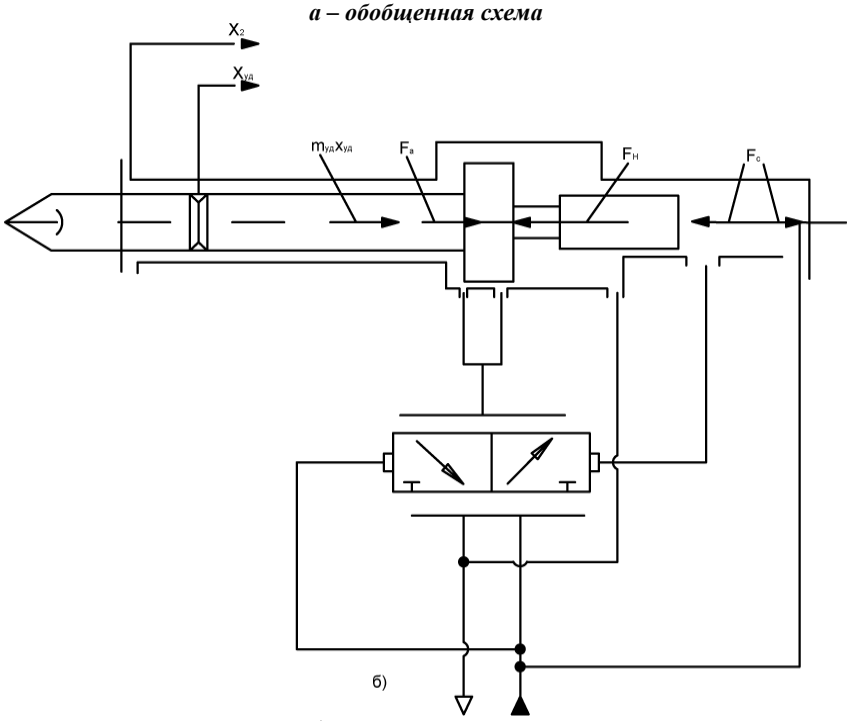
Из рис. 1, а видно, что обобщенная математическая модель представляет собой 4-х массовую систему: ударник-корпус-рукоять-золотник, движущуюся под действием активных усилий, определяемых разностью давлений жидкости в соответствующих камерах и их поперечными сечениями [9-11]. Модель включает также начальные и граничные условия движения (свойства забоя учитываются коэффициентом отскока и величиной внедрения инструмента в породу), условия периодичности, уравнение расходов, зависимости между изменением давления в подводимом трубопроводе и изменением расхода. Значения давлений в рабочих камерах и камерах распределителя и насоса определяются через давления в напорной и сливной магистралях [12-15].

В упрощенной модели (рис. 1, б) не учитываются подвижность корпуса, потери давлений в магистральном и сливном трубопроводах, внедрение инструмента в породу.

На рис. 2-6 представлено решение в системе Mathcad упрощенной модели динамической схемы гидравлического молотка.



а – обобщенная схема



б – упрощенная схема

Рис. 1. Динамические схемы гидравлического молотка

Моделирование динамики гидромолотка

1. Исходные данные:

$ен := 4 \cdot 10^{-11}$ - объемная податливость магистрали, м^5/н;

$Qн := 230 \cdot 10^{-6}$ - расход насоса, м^3/с;

$r := 0.1 \cdot 10^{-11}$ - удельные утечки, м^5/н с;

$mб := 0.18$ - масса бойка, кг;

$S2 := 1.28 \cdot 10^{-4}$ - площадь камеры обр. хода, кв. м;

$S1 := 0.9 \cdot 10^{-4}$ - площадь камеры пр. хода, кв. м;

$Pc := 0$ - давление в сливной магистрали, Па;

$Vб := 14$ - критическая скорость бойка, м/с;

$Pк := 11 \cdot 10^{5}$ - давление настройки клапана, Па;

$q := 1.5 \cdot 10^{-4}$ - удельный расход клапана, м^3/с;

$l03 := 0.0055$ - координата золотника при переключении режимов пр. и обр. хода, м;

$l0 := 0.042$ - координата бойка при соединении управляющей камеры золотника со сливн. магистралью, м;

$xzv := 0$ - конструктивный размер положения отверстия, м.

$C_v := 20$ - коэффициенты в выражении

$K1 := 0.25 \cdot 10^{-4}$ силы трения;

$S3 := 4.91 \cdot 10^{-4}$ - площадь вспомог. камеры, кв. м;

$mз := 0.032$ - масса золотника, кг;

$S4 := 0.471 \cdot 10^{-4}$ - площадь камеры золотника, кв. м;

$C4 := 650$ - жесткость пружины золотника, н/м;

$x20 := 0$ - предв. поджатие пружины золотника, м;

$Rvosst := 0.15$ - коэффициент восстановления скорости;

Рис. 2. Исходные данные для моделирования динамики гидромолотка в системе Mathcad

2. Моделирование режима движения поршня

Функции давления в камерах 1 - 4 и расходов (к - клапан; з - золотник; б - ударный механизм):

$P1(x2) := x2$

$P3(Pc) := Pc$

$$P2(x2,Pc,x1) := \begin{cases} x2 & \text{if } x1 \le l03 \\ Pc & \text{if } x1 > l03 \end{cases}$$

$$Qк(x2) := \begin{cases} 0 & \text{if } x2 \le Pк \\ q \cdot (x2 - Pк) & \text{if } x2 > Pк \end{cases}$$

$$P4(x2,Pc,x0) := \begin{cases} x2 & \text{if } x0 < l0 + xzv \\ Pc & \text{if } x0 \ge l0 + xzv \end{cases}$$

$Qз(x4) := x4 \cdot S4$

$$Qб(x3,x1) := \begin{cases} x3 \cdot S2 - x3 \cdot S1 & \text{if } x1 \le l03 \\ (-x3 \cdot S1) & \text{if } x1 > l03 \end{cases}$$

$$Fпруж(x1,x4) := \begin{cases} C4 \cdot (x1 + x20) & \text{if } x1 > 0 \\ 10000 \cdot x1 + 150 \cdot x4 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Система ДУ:

$D0(x3) := x3$

$D1(x4) := x4$

$$D2(x1,x2,x3,x4) := \frac{1}{eн} \cdot [Qн - Qб(x3,x1) - Qз(x4) - r \cdot (x2 - Pc) - Qк(x2)]$$

$$D3(x1,x2,x3) := \frac{1}{mб} \cdot \left[-P1(x2) \cdot S1 + P2(x2,Pc,x1) \cdot S2 + \frac{-x3}{Vб} \cdot (C + K1 \cdot P1(x2)) + P3(Pc) \cdot S3 \right]$$

$$D4(x0,x1,x2,x4) := \frac{1}{mз} \cdot (x2 \cdot S4 - P4(x2,Pc,x0) \cdot S4 - Fпруж(x1,x4))$$

Начальные условия и шаг интегрирования:

$x := (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$ $\quad h := 10^{-6}$

Рис. 3. Результаты моделирования динамики гидромолотка в системе Mathcad

Результаты вычислений:

$T := Z_0$ $\quad Sуд := Z_1$ $\quad Sз := Z_2$ $\quad Pмаг := Z_3$ $\quad Vуд := Z_4$ $\quad Vз := Z_5$

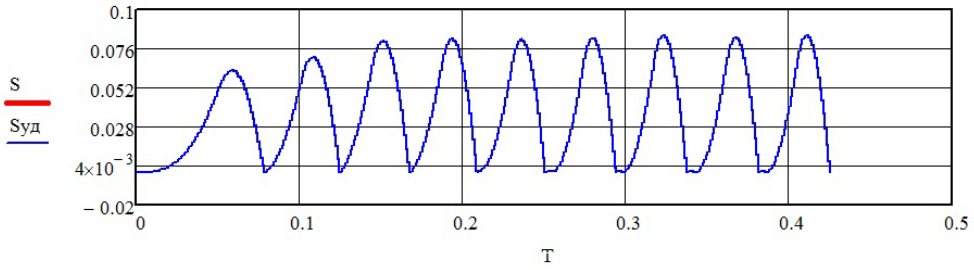


Рис. 4. Перемещение ударника

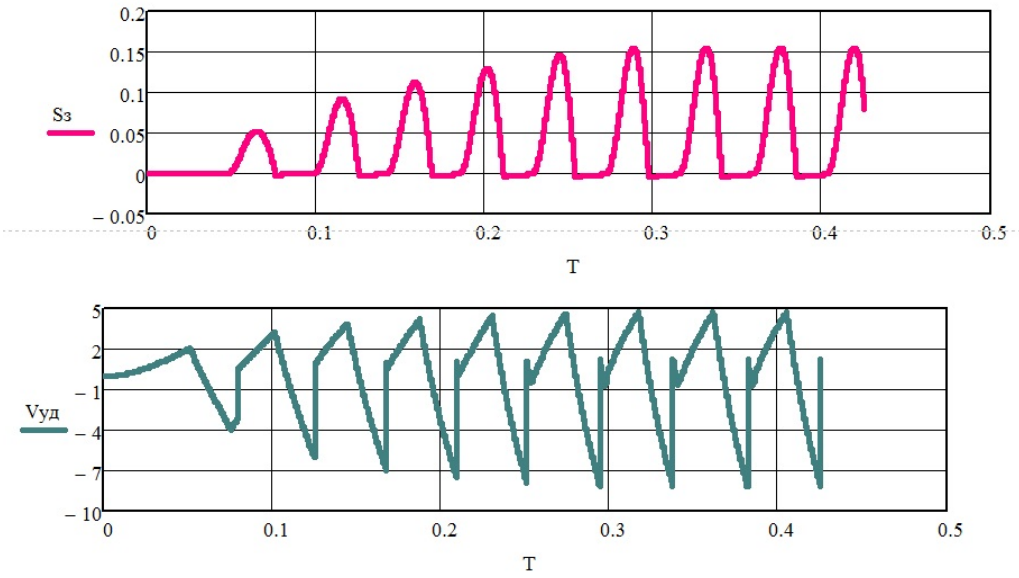


Рис. 5. Перемещение золотника и скорость ударника

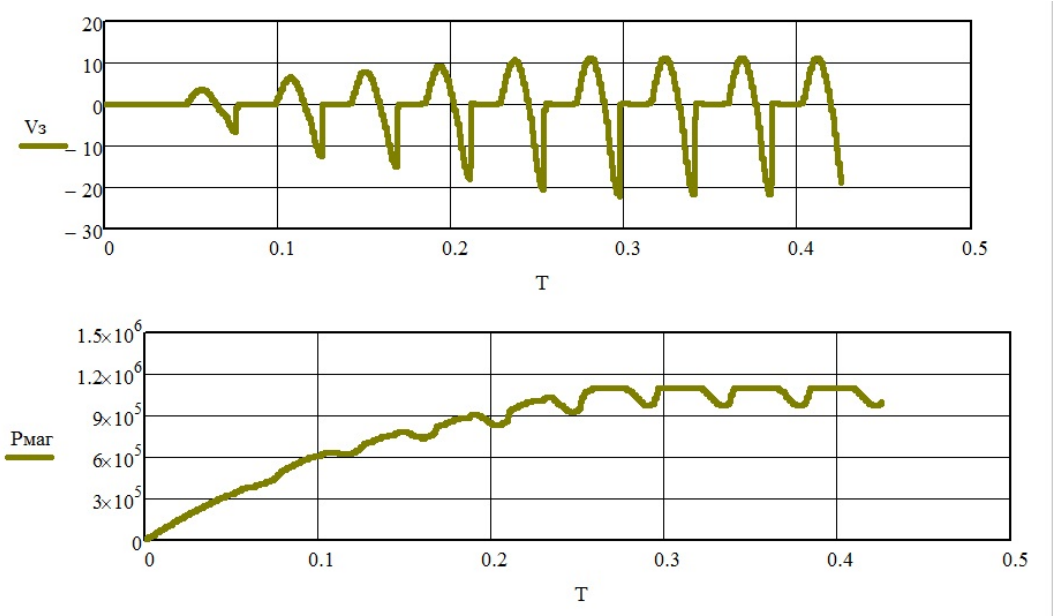


Рис. 6. Скорость золотника и давление в напорной магистрали

В соответствии с полученными результатами может быть осуществлен анализ реализуемых внутренних процессов в приводе гидромолотка и определен его главный параметр – энергия единичного удара. Дальнейшее развитие работы предусматривает переход к решению обобщенной модели с целью оценки уровня вибрационных воздействий, действующих на оператора.

Список литературы

1. Дроздов А.Н. Ручные машины для строительно-монтажных работ (устройство и основы расчета). М.: МГСУ, 1999. 250 с.

2. Быховский И.И., Гольдштейн Б.Г. Основы конструирования вибробезопасных ручных машин М.: Машиностроение, 1982. 233 с.

3. Немков С.А., Дроздов А.Н., Степанов В.В. Модель работы компрессионно-вакуумного ударного механизма электрического перфоратора // Механизация строительства. 2016. № 11. С. 85-93.

4. Кудрявцев Е.М. Mathcad 8. Символьное и численное решение разнообразных задач. М.: ДМК. 2000. 318 с.

5. Баландин В.П., Колган Ю.Н., Прохоров И.А. Новые ручные электрические перфораторы. М.: ЦНИИТ-Эстроймаш, 1986. 39 с.

6. Дроздов А.Н., Колган Ю.Н. Результаты моделирования динамики ручных электрических молотков и перфораторов в системе Mathcad // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Интерстроймех–2005». Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. С.189-194.

7. Гольдштейн Б.Е., Дроздов А.Н. Разработка основ создания ручных машин для выполнения монтажных минитехнологий // Механизация строительства. 2016. №11. С. 34-42.

8. Дроздов А.Н. Экспериментально-теоретические методы оценки энергосиловых характеристик гайковертов. М.: МГСУ, 2006. 176 с.

9. Stepanov V.V., Drozdov A.N. The process of tightening a threaded connection with a impact wrench // Mechanization of construction. 2011. V. 8. PP. 15-18.

10. Кудрявцев Е.М., Степанов М.А. Строительные краны. Часть 1. Башенные краны. Основы теории, конструкции, расчет. Учебник для вузов. М.: Издательство АСВ, 2016. 330 с.

11. Дроздов А.Н., Степанов В.В. Ручные гидроимпульсные гайковерты. М., Саратов: МИСИ-МГСУ, Ай Пи Эр Медиа, 2017. 1 электрон. опт. диск (CD-R).

12. Елагин М.Ю., Сидоров Е.М. Моделирование рабочего процесса ротационного пневматического двигателя с тангенциальными лопатками // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 12. В 2 ч. Ч. 1. С.170-178.

13. Ушаков Л.С., Котылев Ю.Е., Кравченко В.А. Гидравлические машины ударного действия. М. Машиностроение, 2000. 416 с.

14. Глебов Б.Н. Научные основы создания гидравлических ручных машин ударного действия: дис. … д-ра техн. наук. Казахстан. Караганда, 2010. 291 с.

15. Анцев В.Ю., Игнатенко Е.Ю., Панфёрова Т.А. Совершенствование процесса технической эксплуатации подъёмно-транспортных машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. Вып. 2. В 2 ч. Ч. 1. С. 187 – 192.

Дроздов Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, drozdovan@mgsu.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Белкина Елена Романовна, студент, lena.belkina8@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

COMPUTER METHODS FOR SOLVING DYNAMIC MODELS OF MECHANIZED TOOLS USING THE EXAMPLE OF HYDRAULIC HAMMERS

A.N. Drozdov, E.R. Belkina

The article presents a dynamic model of a manual hydraulic hammer describing the movements of the striker-housing-handle-valve. The choice of an effective solution of the mathematical model using the MathCad computer system is substantiated. As a result of its application, a solution of a simplified version of the mathematical model is implemented, which made it possible to obtain the characteristics of the striker movement necessary for assessing the energy of a single blow.

Key words: hydraulic hammer, mathematical model, dynamic scheme, mechanized tool.

Drozdov Anatoly Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, drozdovan@mgsu.ru, Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering,

Belkina Elena Romanovna, student, lena.belkina8@yandex.ru, Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering

УДК 629.4.018
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-34-35

ОБ ОПЫТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

С.Н. Литунов

Рассмотрено применение электрогидравлического эффекта (Юткина) в мини насосе, имеющем малые размеры, относительно большую производительность и отсутствие подвижных частей. Разработана конструкция лабораторного макета мининасоса, получены зависимости частоты разряда и дальности полета капель воды от зазора между электродами в рабочей камере насоса. Выяснены некоторые особенности работы такого насоса, ограничивающие применение электрогидравлического эффекта при перекачивании жидкостей.

Ключевые слова: электрогидравлический эффект, мини насосы, перекачивание жидкостей

Введение. Эффект электрического разряда в сплошной среде с высвобождением большой механической энергии открыт Львом Александровичем Юткиным (1911–1980 г.г.), советских ученым и изобретателем, и официально зарегистрирован в 1950 г. [1]. В настоящее время это явление известно как электрогидравлический эффект (ЭГЭ) или эффект Юткина. В СССР для изучения этого эффекта были созданы: авторская лаборатория в Ленинградском политехническом институте, Межотраслевая лаборатория ЭГЭ, Сельскохозяйственная проблемная лаборатория ЭГЭ, Центральная НИЛ ЭГЭ. Коллектив исследователей под руководством Юткина Л.А. в течении нескольких десятков лет занимался исследованием этого явления. Были получены более 150 авторских свидетельств, издано 2 монографии [2, 3], опубликовано несколько десятков научных и научно-популярных статей, были сняты научно-популярные фильмы [4, 5]. Юткиным Л.А. были исследованы и предложены многочисленные варианты применения ЭГЭ: в машиностроении и металлообработке, в горном деле и производстве строительных материалов, в химической и агропромышленной отраслях. Лев Александрович считал, что в результате проведенных исследований появилось новое направление в науке — импульсная электрохимия, которое он развить не успел. Были разработаны и применялись в промышленности устройства для бурения и дробления твердых пород, объемной штамповки, обеззараживания воды, эмульгирования растворов и многое другое. Сам эффект и его применение описаны в учебниках [6].

Сегодня исследования ЭГЭ продолжаются в самых разных областях науки и техники, как на уровне диссертаций [7], так и отдельных исследований. Последних поисковые системы глобальной сети выдают около тысячи, поэтому в данной работе нет возможности провести их полный анализ. Встречаются и разработки промышленного уровня [8]. В Омском политехническом институте (ныне Омский государственный технический университет) несколько лет работала НИЛ, в которой изучалась возможность применения ЭГЭ при перекачивании жидкостей.

Традиционно ЭГЭ использовался для обработки и транспортировки больших объемов жидкости с применением мощных источников высокого напряжения. Анализ доступных источников показал отсутствие работ, посвященных изучению ЭГЭ применительно к малоразмерным насосам. Известно большое количество микронасосов разного принципа действия, применяемых для перекачивания малых объемов жидкости: мембранные, перистальтические, пьезоэлектрические, капиллярные, с химическим приводом. Все указанные конструкции насосов предназначены для перекачивания количества жидкости в микроразмерном объеме, что и дает возможность называть их микронасосами, хотя по своим габаритным размерам их правильнее называть мининасосами. Наибольшая привлекательность в применении мининасоса с применением ЭГЭ заключается в соотношении размер/производительность/отсутствие подвижных частей. Однако при исследовании возможностей такого насоса мы столкнулись с некоторыми его особенностями. В статье описан опыт использования эффекта Юткина при исследовании мининасоса.

Эксперимент. Применяли устройство, построенное с использованием [9] и данных, изложенных в [10]. На рис. 1 приведена схема лабораторной установки и ее изображение. Источник высокого напряжения имел мощность 5 Вт, что определялось его назначением, и выдавал напряжение 10 кВ.

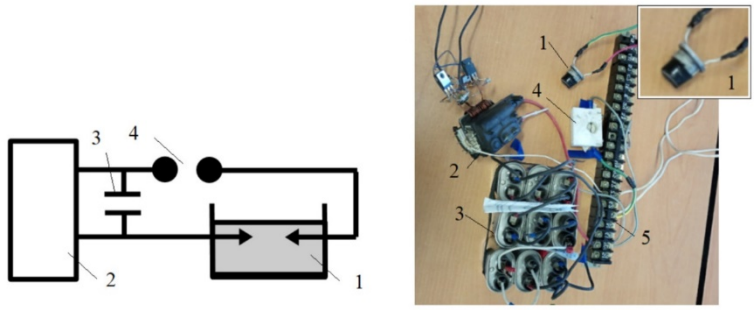


Рис. 1 Схема (слева) и изображение лабораторной установки (справа) для получения ЭГЭ: 1 — мининасос; 2 — источник высокого напряжения; 3 — пакет конденсаторов; 4— разрядник; 5 — монтажная колодка

На рис. 2 показана схема, поясняющая устройство мини насоса, построенного с использованием ЭГЭ.

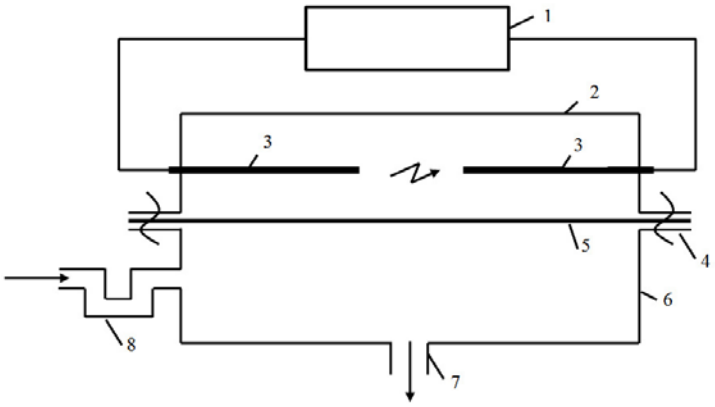


Рис. 2 Схема мининасоса с использованием ЭГЭ: 1 — источник высокого напряжения с разрядниками; 2 — верхняя часть корпуса; 3 — электроды; 4 - фланец; 5 — мембрана; 6 — нижняя часть корпуса; 7 — выходное отверстие; 8 — входное отверстие с обратным клапаном лабиринтного типа

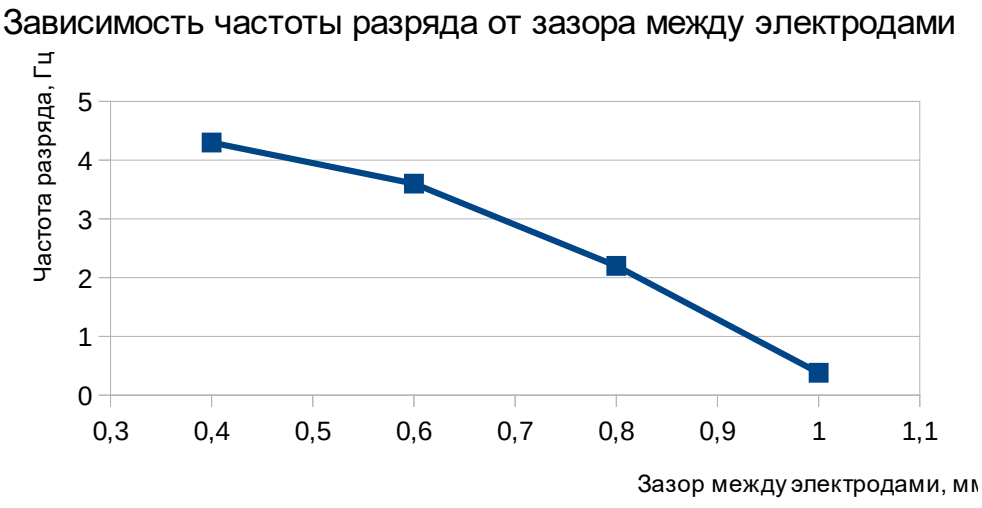


Рис. 3 Зависимость частоты разрядов о расстояния между электродами в рабочей камере

Мининасос выполнен в виде корпуса 2 и 6, в котором смонтированы электроды 3, выполнено выходное 7 и входное 8 отверстия, мембрана 5, отделяющая перекачиваемую разрядную полость от рабочей. В разрядной полости находится вода, в рабочей — перекачиваемая жидкость. Электрический разряд формируется с помощью источника высокого напряжения 1 и разрядника 2 (на рисунке слева не показан). Разряд через электроды 3 проходит через жидкую среду, формируя механический импульс, воздействующий на мембрану 5. Перекачиваемая жидкость под действием мембраны выходит из полости мининасоса через выходное отверстие 7 диаметром 1 мм. Пополнение перекачиваемой жидкости происходит через входное отверстие 8. Для гашения давления во входном отверстии 8 предусмотрен обратный клапан лабиринтного типа.

В мининасосе предусмотрена возможность установки мембраны, которая изолирует жидкость рабочую от жидкости перекачиваемой. При проведении опытов зазор между электродами в разряднике был постоянным и равным 1.0 мм, зазор между электродами в насосе регулировали с помощью набора щупов.

Результаты и обсуждение. На рис. 3 приведена зависимость частоты разрядов от расстояния между электродами в рабочей камере. Нужно отметить, что указанная зависимость относится только к параметрам лабораторной установки, изложенным выше.

Из рисунка видно, что для указанных параметров источника высокого напряжения при зазоре менее 0.4 мм импульсные разряды переходили в постоянный разряд. При зазоре более 1 мм импульсы прекращались. Для появления разрядов при таком зазоре требуется более мощный источник высокого напряжения.

Мощность разряда определялась опосредованно, через расстояние, которое пролетали капли воды, выходя из отверстия мининасоса.

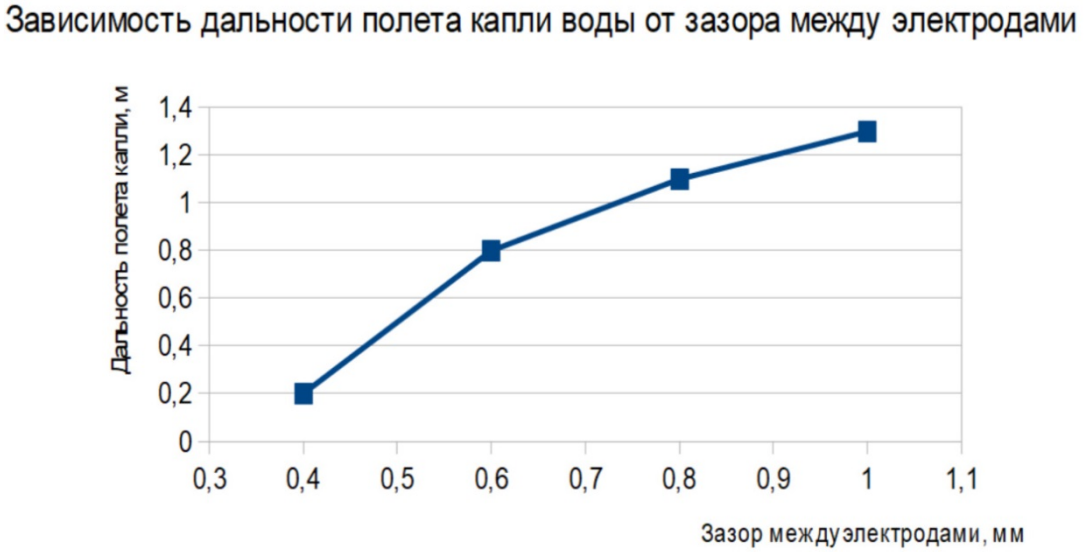


Рис. 4 Зависимость дальности полета капель воды от расстояния между электродами в рабочей камере

Из рисунка видно, что при минимальном расстоянии между электродами, когда частота разрядов максимальна, а их мощность минимальна, дальность полета капли составляла 0,2 м, а для максимального зазора в 1 мм, капли летели на расстояние более метра. Очевидно, что производительность насоса будет максимальной при минимальном зазоре, однако при этом нужно учитывать давление на выходе из насоса, которое необходимо подбирать из конкретных условий, в которых насос должен работать.

Проведенные опыты выявили ряд особенностей, как относительно мининасоса, так и относительно других устройств с использованием ЭГЭ.

Во-первых, при прохождении разряда через жидкую среду происходит ее преобразование. В воде это электролиз с выделением водорода и кислорода. При построении насоса промышленного применения, работающего с водой, необходимо предусматривать отведение и утилизацию выделяемых газов, что усложняет конструкцию.

В случае использования в качестве рабочей жидкости минерального масла происходило его «подгорание». Это выражалось в том, что в чистом масле после 2-3 разрядов образовывались «нити» черного цвета, а через 50-60 разрядов весь объем масла (в опытах - 5 мл) становился черным и непрозрачным. Черный цвет масла обусловлен разрушением молекул веществ, входящих в масло, с отделением атомов углерода. Это происходит под действием температур и, возможно, излучений, которые генерируется при прохождении разряда.

Очевидно, что и другие жидкости, в том числе топливо для двигателей внутреннего сгорания, так же будут разрушаться, поэтому требуется отделение рабочей жидкости от перекачиваемой. Это и обусловило использование изолирующей мембраны.

Во-вторых, как отмечалось Юткиным Л.А. ударная волна, образованная в результате разряда, быстро затухает (по мнению Юткина Л.А., обратно пропорционально квадрату расстояния). Поэтому мембрану необходимо располагать максимально близко к электродам. При этом мембрана подвергается мощному воздействию мощной ударной волны (до 1.3×10^{10} Па) и быстро выходит из строя. В нашем случае прорезиненная ткань толщиной 0.3 мм, расположенная на расстоянии 1-1.5 мм от электродов, теряла герметичность через 100-150 разрядов.

В-третьих, стабильность получения разряда (в любой жидкости) была невысокой. После остановки опытов на несколько минут приходилось регулировать зазор в разряднике, иначе разряд не происходил. Вероятно, на электродах, как в разряднике, так и насосе, накапливался нагар, повышающий электрическое сопротивление. Для его преодоления нужно устанавливать источник питания с запасом мощности и, желательно, с возможностью регулирования напряжения первого пробоя.

В-четвертых, открытым остается вопрос о КПД электрогидравлического эффекта. В работах Юткина Л.А. говорится о высоком КПД ЭГЭ, однако методики расчета, например, в монографиях, не приводится. Попытки исследователей определить КПД приводят к неожиданным результатам. Так в [11] расчет, проведенный на основе эксперимента, показал КПД равный 1.02 %. В [12] указывается, что КПД ЭГЭ *может* достигать 30 %, что конечно больше,

чем в предыдущем случае, однако не превышает КПД других электрических установок. В социальных сетях встречаются ролики, в которых КПД, по мнению авторов, составляет 1200 %. Ссылки на подобные материалы не приводятся по причине их неправдоподобности.

В-пятых, при разряде генерируется шум, который классифицируется как импульсный (отдельные звуковые волны продолжительностью до 1 с), инфразвуковой (частота до 20 Гц). Интенсивностью звука составляла 72 дБ при минимальном расстоянии между электродами и 88 дБ — при максимальном. Измерения проводились с помощью шумомера ВШВ–003–М2 на расстоянии 1 м от источника шума. Для мининасоса, работающего в непрерывном режиме, такой уровень шума неприемлем. Звукоизоляция же увеличивает сложность и размеры устройства.

Выводы. Выяснено, что:

а) вследствие разрушающего воздействия разряда на жидкость для перекачивания жидкостей в «чистом» виде ЭГЭ использовать нельзя. Использование изолирующей мембраны снижает эффективность разряда;

б) ЭГЭ обладает невысокой стабильностью, что требует дополнительных затрат на систему управления разрядом;

в) разряд сопровождается мощной звуковой волной, на которую уходит до 30 % подводимой энергии [11]. При проектировании устройств, работающих в помещении, требуется предусматривать звукоизоляцию.

Заключение. Электрогидравлический эффект известен около 90 лет. Благодаря усилиям Юткина Льва Александровича производились исследования ЭГЭ, серийно строились и применялись установки для разных отраслей промышленности. В СМИ эффект Юткина называют «опередившим на десятилетия», «забытым», «недооцененным» и даже «замалчиваемым». Это не соответствует действительности. Этому эффекту посвящены многочисленные исследования, он описан в учебниках. Следует отметить, что эффективность применения любой технологии тем выше, чем меньше у нее «конкурентов». Видимо, на современном этапе эффект Юткина проигрывает параллельным технологиям, в том числе по энергоэффективности. В условиях прогрессирующего удорожания электроэнергии затраты на нее играют решающую роль. Этим, возможно, и объясняется тот факт, что на предприятиях России нам не удалось обнаружить установки с применением ЭГЭ. Изучение ЭГЭ продолжается, но исследователи, в том числе и автор данного материала, не идут дальше идей, заложенных Юткиным Л.А. Можно предположить, что через некоторое время ЭГЭ получит новый толчок в развитии с новой, неожиданной стороны.

Список литературы

1. Способ получения высоких и сверхвысоких давлений : авторское свидетельство 105011 СССР : МПК B21D 26/14, B21J 5/04 / Л.А. Юткин, Л.И. Гольцова (СССР). - 416898; заявлен 15.04.1950; опубликован 01.01.1957.

2. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М: Машгиз, 1955. 52 с.

3. Юткин Л.А. Электрогидравлическй эффект и его применение в промышленности. Л: Машиностроение, 1986. 253 с.

4. Электрогидравлический эффект // Наука и техника. Киножурнал. №7 (207), 1957. Леннаучфильм. [Электронный ресурс] URL : https://dzen.ru/a/YDkiRYL8IXVNHzr7 (дата обращения: 16.07.2024).

5. Человек, приручивший молнию // Леннаучфильм. ПТО «Человек», 1995 [Электронный ресурс] URL https://www.youtube.com/watch?v=8flwr4_htN8 (дата обращения 16.07.2024).

6. Евтюкова И.П. Электротехнологические промышленные установки / И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский; под ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.

7. Иванова Н.В. Электрогидравлический эффект в гетеродисперсных системах гидролизного лигнина : дис. … канд-та химич. наук : 05.21.03 / Иванова Надежда Викторовна ; науч. рук. Бабкин В.А., Горохова В.Г. / Красноярская технол. Акад. Красноярск, 1995. 25 с.

8. Установка Импульс-4 // ООО «Электрогидравлика» (Украина). [Электронный ресурс] URL: https://www.youtube.com/watch?v=Cev4mBQCZeU&t=440s (дата обращения 16.07.2024).

9. Патент 155865 Российская Федерация, МПК B41J 2/00. Печатающая головка для струйной печати : № 2015124258/12 : заявл. 2015.06.22 : опубл. 2015.10.20, бюл. № 29 / Литунов С.Н., Тощакова Ю.Д. ; заявитель и патентообладатель ОмГТУ.

10. Литунов С.Н. Определение некоторых параметров печатающей головки для 3D принтера / С.Н. Литунов, Н.И. Филенко, О.В. Чемисенко, Н.С. Кощеева // Омский научный вестник, 2016. № 5 (149). С. 25-29/.

11. Эффект Юткина. Теория и практика. [Электронный ресурс] URL: https://www.youtube.com/watch?v=XHdJgBU8OOY&t=6 (дата обращения 21.10.2024).

12. Колосовская Н.А. Расчет характеристик и КПД электрогидравлического удара // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2007. № 3 (12). - С. 57-69.

Литунов Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, litunov-sergey@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

ABOUT THE EXPERIENCE OF USING THE ELECTROHYDRAULIC EFFECT

S. N. Litunov

The application of the electrohydraulic effect (Yutkin) in a mini pump with small dimensions, relatively high productivity and no moving parts is considered. The design of a laboratory model of a mini pump is developed, the dependences of the discharge frequency and the flight range of water drops on the gap between the electrodes in the working chamber of the pump are obtained. Some features of the operation of such a pump, limiting the application of the electrohydraulic effect when pumping liquids, are clarified.

Key words: electrohydraulic effect, mini pumps, pumping liquids.

Litunov Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, litunov-sergey@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 004.94
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-38-39

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ РЕЗЬБОНАРЕЗАНИИ МЕТЧИКОМ В ГЛУХИХ ОТВЕРСТИЯХ

Н.Ю. Мирзоян, М.В. Заморёнов, А.О. Харченко

На основе ранее разработанной аналитической модели, в статье отражено построение имитационной модели с использованием среды AnyLogic, описывающей влияние процесса формообразования мелкоразмерной внутренней резьбы на надежность инструмента. Далее проводится верификация аналитической и имитационной моделей путем сравнения результатов. В качестве основного результата моделирования выбирается математическое ожидание (МО) времени нахождения системы в состояниях простоя.

Ключевые слова. Внутренняя резьба, отказ функционирования, параметрический отказ, переналадка, восстановление, имитационная модель, аналитическая модель, верификация.

Одним из важнейших этапов разработки технической системы, является её моделирование, которое должно исключать появление ошибок. Поэтому, одним из важнейших этапов моделирования, является верификация данной модели. Для этого к разработанной аналитической модели строится имитационная модель и проводятся эксперименты для осуществления дальнейшей верификации [1,2,3].

Поломка метчика или его деформация приводят к появлению брака и снижению производительности, что вызывает значительные потери в производстве [4]. Для контроля данного процесса необходимо учитывать все возможные состояния инструмента. Рассмотрим функционирования системы инструмента (метчика), граф состояний которой представлен на рисунке 1. Для описания функционирования системы используем полумарковские состояния [5,6,7]: $E = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$.

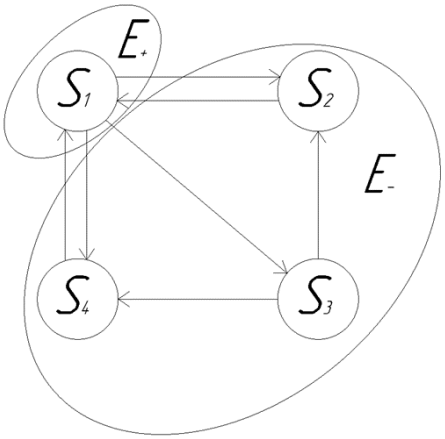


Рис. 1. Граф состояний инструмента

Система включает в себя следующие состояния: S_1 – безотказная работа; S_2 – переналадка; S_3 – параметрический отказ (до переналадки x, до отказа y); S_4 – отказ функционирования; α_1 – среднее время наработки на отказ; β_1 – среднее время восстановления после отказа функционирования (G1); α_3 – среднее время до контроля момента параметрического отказа; α_4 – среднее время до переналадки; β_4 – среднее время переналадки.

На Рис. 2 представлена модель исследуемой системы в AnyLogic.

Модель функционирует следующим образом [8,9]. Блок source (source1, source2, source3) генерирует агентов, используется в качестве начальной точки диаграммы процесса, формализующей поток агентов. Блок delay («обслуживание», «ВБР» – время безотказной работы, «ВВ» – время восстановления, «ВдоПН» – время до переналадки, «Пн» – переналадка, «ВдоПО» – время до параметрического отказа, «ПО» – параметрический отказ) задерживает агентов на заданный период времени. Настройка блока delay для «ВВ» представлена на рисунке 3. Блок sink уничтожает поступивших агентов, используется в качестве конечной точки потока агентов. Когда в блок «ВВ» (восстановление) поступает агент, имитируется состояние отказа системы и сбрасывается «ВдоПН» и «ВдоПО». При поступлении агента в блок «Пн», имитируется переналадка системы и обновляется время безотказной работы. При поступлении

агента в блок «ПО», имитируется параметрический отказ системы и, так же, как у состояния переналадки, обновляется время безотказной работы.

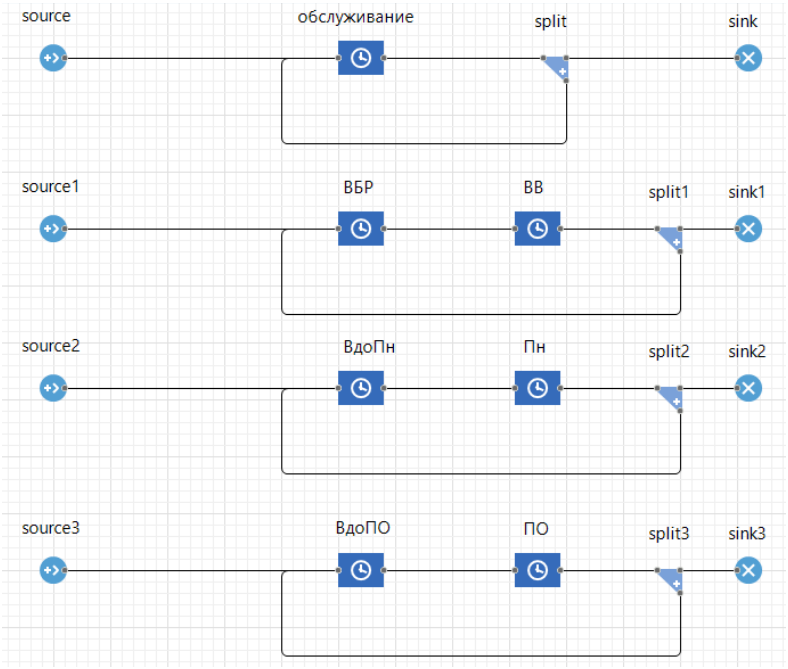


Рис. 2. Модель системы в AnyLogic

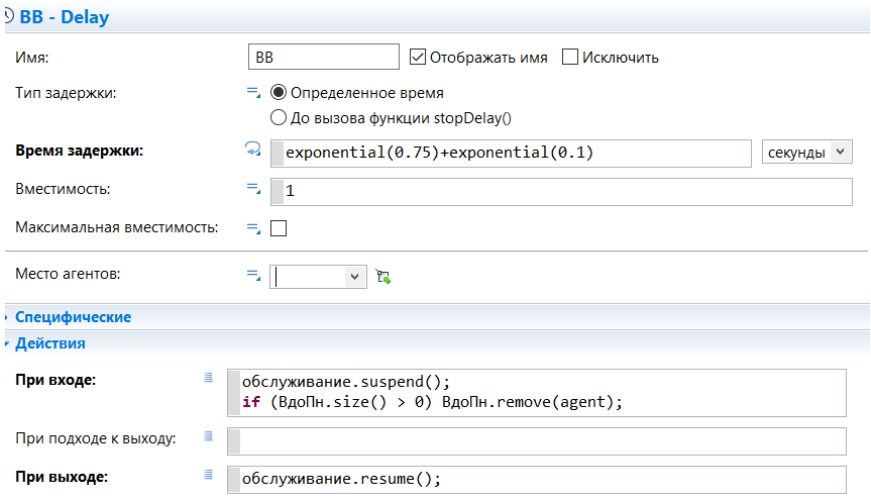


Рис. 3. Настройка блока «ВВ»

Исходными данными для моделирования [10] служат функции распределения $R_1(t)$, $R_2(t)$, $R_3(t)$, $R_4(t)$, $G_1(t)$; которым соответствует обобщенный закон Эрланга второго порядка с параметрами λ_1, λ_2, λ_3, λ_4, λ_5, λ_6, λ_7, λ_8, λ_9, λ_{10}, $ч^{-1}$ соответственно с учетом зависимостей:

$$f_1(t)=\frac{\lambda_1\cdot\lambda_2\cdot(e^{-\lambda_1\cdot t}\cdot e^{-\lambda_2\cdot t})}{\lambda_2-\lambda_1},\quad f_2(t)=\frac{\lambda_3\cdot\lambda_4\cdot(e^{-\lambda_3\cdot t}\cdot e^{-\lambda_4\cdot t})}{\lambda_4-\lambda_3},$$

$$f_3(t)=\frac{\lambda_5\cdot\lambda_6\cdot(e^{-\lambda_5\cdot t}\cdot e^{-\lambda_6\cdot t})}{\lambda_6-\lambda_5},\quad f_2(t)=\frac{\lambda_7\cdot\lambda_8\cdot(e^{-\lambda_7\cdot t}\cdot e^{-\lambda_8\cdot t})}{\lambda_8-\lambda_7},$$

$$g_1(t)=\frac{\lambda_9\cdot\lambda_{10}\cdot(e^{-\lambda_9\cdot t}\cdot e^{-\lambda_{10}\cdot t})}{\lambda_{10}-\lambda_9},$$

где $\lambda_1=2$; $\lambda_2=0{,}05$; $\lambda_3=0{,}7$; $\lambda_4=0{,}4$; $\lambda_5=0{,}5$; $\lambda_6=0{,}35$; $\lambda_7=0{,}7$; $\lambda_8=0{,}5$; $\lambda_9=0{,}75$; $\lambda_{10}=0{,}1$.

В таблице представлены результаты моделирования системы в среде имитационного моделирования *AnyLogic* и в среде аналитического моделирования *Maple*.

Результаты моделирования

№ п/п	Время нахождения системы в состоянии E_- (имит.)	МО времени нахождения системы в состоянии E_- (имит.)	МО времени нахождения системы в состоянии E_- (аналит.)	Относитель-ная погрешность, %
1	0,989	0,992	0,990	0,2
2	0,997			
3	1,001			
4	0,993			
5	0,979			
6	1,002			
7	0,998			
8	0,990			
9	0,979			
10	0,996			

Как видно из таблицы, расхождение полученных математических ожиданий времени нахождения системы в состоянии E_- в аналитической и имитационной моделях не превышает 0,5%, что подтверждает достоверность аналитической модели. Применение разработанной полумарковской модели будет служить для оптимизации процесса формообразования внутренней резьбы на основе совершенствования цикла обработки, конструкций инструмента и оборудования, что, в свою очередь, будет оказывать влияние на надежность и производительность системы.

Список литературы

1. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем: Монография. – Севастополь: СевНТУ, 2012. 700с.
2. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1982. 231 с.
3. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. Пер. с нем. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.
4. Братан С.М., Канареев Ф.Н., Новиков П.А., Харченко А.О. Повышение точности формообразования внутренних резьб М3…М6 в деталях из алюминиевых сплавов. М.: ИНФРА-М, 2016. 163 с.
5. Королюк В.С. Стохастические модели систем. Отв. ред. А.Ф. Турбин. Киев: Наукова думка, 1989. 208 с.
6. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. К.: Наук. Думка, 1976. 181 с.
7. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
8. Копп В.Я, Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. 284 с.
9. Заморёнов М.В., Копп В.Я., Заморёнова Д.В. Метод моделирования регенерирующих систем. // Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 6. С. 134-144.
10. Мирзоян Н.Ю., Заморёнов М.В., Харченко А.О. Анализ надежности инструмента при мелкоразмерном внутреннем резьбонарезании метчиком. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2024. № 9. С. 625-628.

Мирзоян Наталия Юрьевна, ассистент, nataly2997@mail.ru, Россия, Севастопольский государственный университет,

Заморёнов Михаил Вадимович, канд. техн. наук, доцент, zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

Харченко Александр Олегович, канд. техн. наук, профессор, aokharchenko@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

A SIMULATION MODEL FOR ANALYZING THE RELIABILITY OF A TOOL WHEN TAPPING WITH A TAP IN BLIND HOLES

N.Y. Mirzoyan, M.V. Zamoryonov, A.O. Kharchenko

Based on the previously developed analytical model, the article reflects the construction of a simulation model using the AnyLogic environment, describing the influence of the shaping process of small-sized internal threads on the reliability of the tool. Next, the verification of analytical and simulation models is carried out by comparing the results. The mathematical expectation (MO) of the time spent by the system in idle states is chosen as the main result of the simulation.

Key words: Internal thread, functional failure, parametric failure, readjustment, restoration, simulation model, analytical model, verification.

Mirzoyan Natalia Yurievna, assistant, nataly2997@mail.ru, Russia, Sevastopol State University,

Zamoryonov Mikhail Vadimovich, candidate of technical sciences, docent, zamoryonoff@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Kharchenko Alexander Olegovich, candidate of technical sciences, professor, aokharchenko@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 655.222.343
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-41-42

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ДЕТАЛЯМ ТИПА ОСЬ

Е.Ю. Рогов, В.Е. Овсянников, А.С. Губенко

Современная теория и практика менеджмента качества показывает, что эффективным инструментом, который дает возможность достичь устойчивого развития, а также снижения потерь всех видов, является управление рисками. В качестве одной из существенных проблем в данном случае можно выделить оценку риска. В работе рассмотрены вопросы совершенствования инструментария оценки рисков. В качестве объекта для анализа выбраны оси колесных пар. Предложены входные факторы для оценки риска. Разработана модель для оценки риска на основе применения элементов искусственного интеллекта. Применение предложенной модели в практике эксплуатации позволит более корректно планировать выполнение ремонтных мероприятий на основе риск-ориентированного подхода.

Ключевые слова: риск, управление качеством, совершенствование, модель.

Анализируя современное состояние инфраструктуры ОАО «РЖД», можно выделить один из наиболее проблемных аспектов – общее старение вагонного парка [1]. Согласно данным ОАО «РЖД», средний срок эксплуатации вагонов составляет 35-40 лет [2]. Одними из наиболее ответственных деталей вагонов являются оси колесных пар. По данным ОАО «РЖД» [2] на сегодняшний день имеется в эксплуатации более 320 тыс. осей колесных пар с истекшим сроком эксплуатации. В этом свете возникает ситуация, когда будет необходимо изымать более 82 тыс. вагонов, что вызовет огромную нагрузку на производственный сектор, а также перебои с перевозкой грузов.

Для того, чтобы снизить напряженность, необходима координация при планировании работ в указанных выше направлениях. Согласно мировой практике управления качеством [3,4], одним из наиболее эффективных инструментов в данном случае можно считать риск-ориентированный подход [4]. В частности, применение инструментов анализа и управления рисками дает возможность планирования ремонтных мероприятий на основе комплексного учета факторов, которые имеют различную природу (технические, организационные, экономические и т.д.).

Для оценки и анализа рисков, используется достаточно большой набор инструментов и методик, наиболее распространенной из которых является FMEA [5]. Обычно процесс оценки рисков включает в себя ряд этапов, главными из которых являются идентификация риска и его оценка.

Учитывая большой объем объектов для оценивания, процедуру определения величины (уровня риска) следует автоматизировать. Главная проблема в данном случае в том, что информация имеет нечеткий характер, а также часть ее задана качественно. В данном случае хорошие результаты может дать использование нейро-нечетких моделей. В связи с изложенным выше, можно сформулировать **цель** исследования, которая заключается в совершенствовании инструментария оценки рисков на основе разработки модели с использованием искусственных нейронных сетей и нечеткой логики [6].

Материал и методы исследования. При проведении экспериментов и обработки результатов были применимы методы анализа и управления рисками, математического и компьютерного моделирования, искусственных нейронных сетей и нечеткой логики.

Результаты исследования и их обсуждения. Учитывая тот факт, что оси колесных пар испытывают циклические нагрузки, основной причиной их выхода из строя является усталостное разрушение. На рисунке 1 приведен пример кривой, которая характеризует рост усталостной трещины в зависимости от пробега вагона, которая была построена на основе данных [7]. На рисунке также нанесена нечеткая граница, в пределах которой вероятность выхода из строя узла становится неприемлемой.

Случайность внешних факторов порождает нечеткую границу изменения выходного параметра. Поэтому планирование периодичности освидетельствования целесообразно реализовывать на основе риск-ориентированного подхода. С учетом неопределенности данных, имеет смысл применять нейро-нечеткие модели.

В качестве переменных можно выделить:

- режим работы (A, легкий, тяжелый);
- пробег (L, тыс. км.);
- защитное покрытие (P, нанесено или нет).
- выходной параметр уровень риска (R, низкий, средний, высокий, критический)

На рисунке 2 приведена общая структура модели.

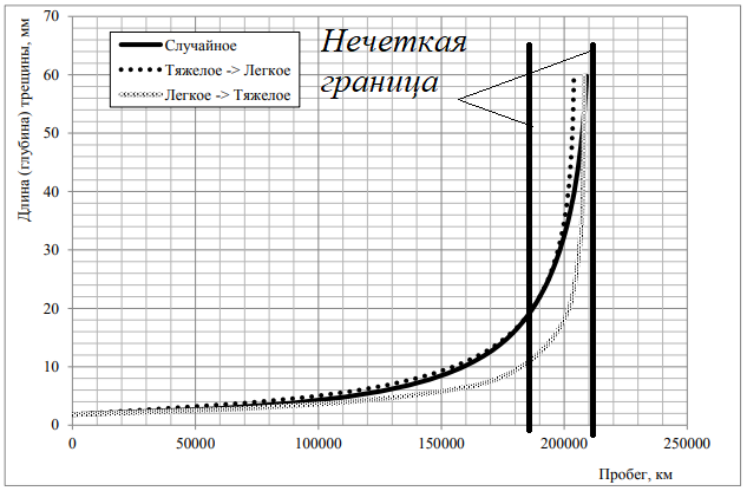


Рис. 1. Зависимости роста усталостной трещины

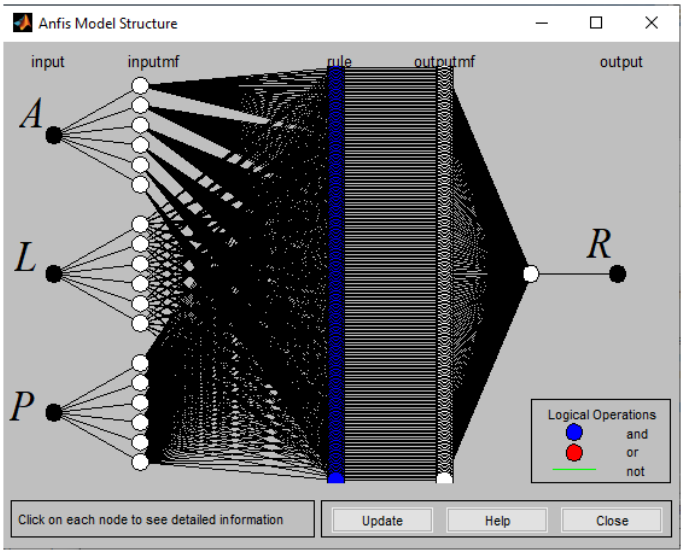


Рис. 2. Общая структура модели для оценки риска

Функции нечеткой логики в разработанной модели задаются системой правил. Пример задания системы правил приведен на рисунке 3.

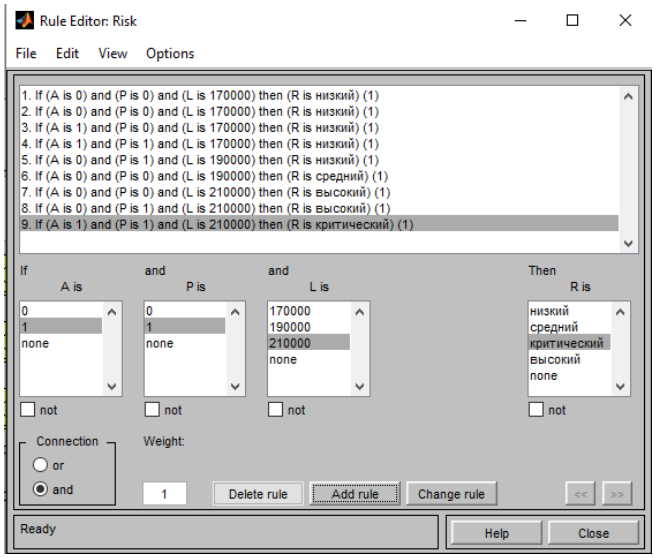


Рис. 3. Задание системы правил

Обучение базы знаний модели для оценки риска выхода из строя осей колесных пар выполнялось по методу обратного распространения ошибки. Данные разделялись на три группы: обучающая выборка, тестовая выборка и проверочная выборка.

По обучающей выборке производилась настройка весовых коэффициентов нейронных сетей. Далее производилась коррекция посредством сравнения с данными тестовой выборки Окончательная проверка выполнялась на основе сравнения результатов обученной базы знаний и данных проверочной выборки. Данные тестирования системы приведены на рисунке 4.

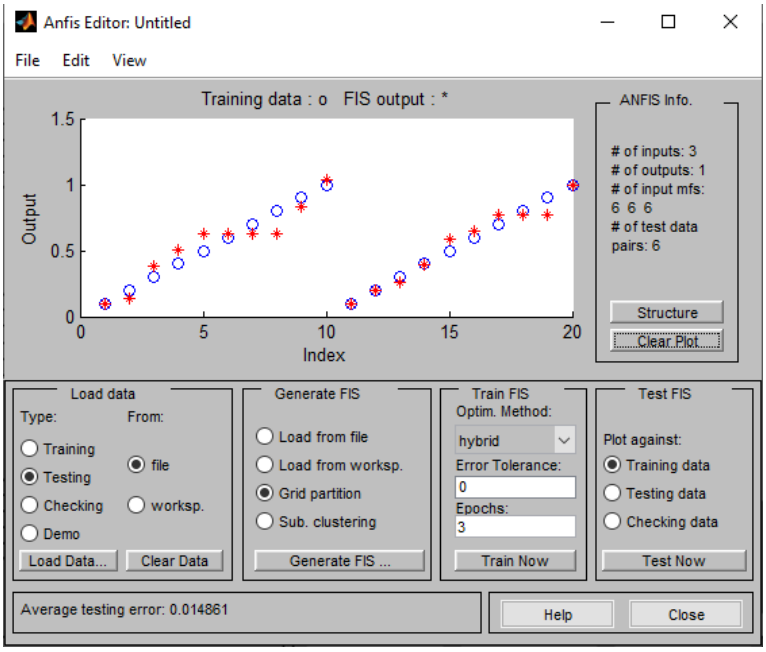


Рис. 4. Результаты тестирования системы

На рисунке 5 приведен пример определения величины риска с использованием разработанной модели.

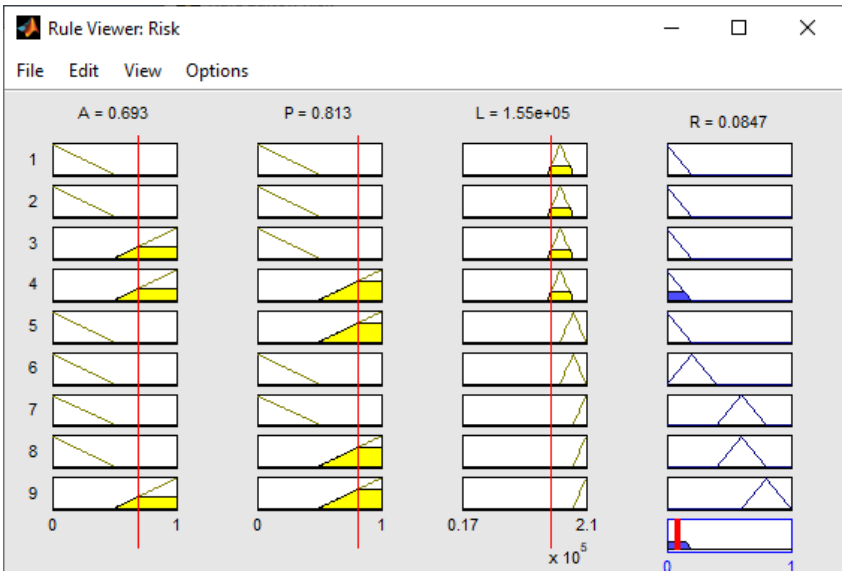


Рис. 5. Оценка риска

Оценка экономического эффекта от реализации разработанного комплекса мероприятий затруднена в силу того, что эффект является ожидаемым. Согласно руководящего документа ОАО «РЖД» [8] по оценке рисков, величину уровня риска можно определить по следующей зависимости:

$$R = f_{\varphi} \cdot c_{\varphi}\,, \tag{1}$$

где f_{φ} – фактическая частота возникновения нежелательного события, 1/год; c_{φ} – фактический размер ущерба от последствий события, руб.

Для определения величины фактической частоты возникновения нежелательного события, целесообразно из данных выбрать те, которые непосредственно вызваны дефектами осей колесных пар [8]. Данные приведем в таблице 1.

Таблица 1

Данные по частоте f

Календарный год	Величина частоты f_i
2011	0.0144
2012	0.0134
2013	0.0135
2014	0.0126
2015	0.0098
2016	0.092
2017	0.0089
2018	0.0085
2019	0.0093
2020	0.0078

Среднее значение:

$$f_\varphi = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} f_{\varphi i} = 0.01074$$

В качестве источника ущерба примем необходимость аварийного ремонта из-за выхода из строя рассматриваемых узлов. В практике ОАО «РЖД», неисправность устраняется посредством отцепки вагона и последующего устранения неисправности. Среднюю величину ущерба принимаем из анализа судебной практики по стоимости отцепочных ремонтов:

$$c_\varphi = N_{OTcp} \cdot C_{рем}, \quad (2)$$

где $N_{OTср}$ – среднее число отцепок в ТР-2 по причине неисправности буксового узла; $C_{рем}$ – средняя стоимость отцепочного ремонта, руб.

Статистика количества отцепок в ТР-2 по причине неисправности буксового узла приведена в таблице 2.

Таблица 2

Число отцепок в ТР-2 по причине неисправности буксового узла

Календарный год	Число отцепок по причине по причине неисправности буксового узла, $N_{OTср}$
2016	27090
2017	27133
2018	33145
2019	35295
2020	30970
2021	28160
2022	13957

Среднее значение $N_{OTcp} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} N_{OTi} = 27964$.

$$R = 0.1074 \cdot 27964 \cdot 56000 = 168.2 млн\ руб.$$

Выводы:

1 Разработана модель для оценки рисков выхода из строя осей колесных пар, которая позволяет более корректно выполнять планирование ремонтных мероприятий и снизить вероятность отцепочного ремонта.

2 Разработанная модель производит оценку в автоматизированном режиме и может быть интегрирована в общую систему управления данными о продукте на стадиях его жизненного цикла.

3 По результатам расчетов ожидаемого экономического эффекта было установлено, что возможно снизить годовой ущерб, который возникает из-за внепланового вывода вагонов в ремонт в среднем на 168.2 млн. руб.

Список литературы

1. Волохов Г.М., Князев Д.А. Возможный подход к нормированию рисков схода подвижного состава по причине разрушения одного из элементов колесной пары // Вестник ВЭлНИИ. 2011. № 2. С. 146–153.

2. Князев Д.А. Обоснование периодичности освидетельствования полых осей колесных пар высокоскоростного подвижного состава : дис. ... кандидата технических наук : 05.22.07 / Д.А. Князев : [Место защиты: Российский ун-т транспорта]. Москва, 2019. 138 с.

3. Bertsekas D.P., Shreve S.E. Stochastic Optimal Control. The Discrete-Time Case. Athena Scientific, Belmont, Massachusetts, 2006.

4. Равицкая О.А. Мировая практика управления качеством и стандарт ISO 9001 // Дельта науки. 2015. № 2. С. 94-96.

5. Панюков Д.И., Козловский В.Н., Киреев К.В. Качество первичных исследований- ключ к повышению эффективности FMEA // Грузовик. 2016. № 7. С. 26-29.

6. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. М.: Финансы и статистика, 2004. 176 с.

7. Volokhov G.M., Timakov M.V., Protopopov A.L., Knyazev D.A. New technologies increasing operational lifecycle of wheelsets // 17th International Wheelset Congress / European Railway Wheels Association (ERWA); UNIFE – the European rail industry; KLW – an Interpipe brand). Part 1. P. 133–137.

8. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте [Электронный ресурс]. URL: http://oac.rgotups.ru/misc/files/39.4.3.pdf (дата обращения: 10.05.2024).

Рогов Евгений Юрьевич, ассистент, evro-evgen@yandex.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Овсянников Виктор Евгеньевич, профессор, ovsjannikovve@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Губенко Арсений Сергеевич, ассистент-стажер, Gubenkoas@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет

IMPROVEMENT OF RISK ASSESSMENT TOOLS FOR PARTS OF AXIS TYPE

E.Yu. Rogov, V.E. Ovsyannikov, A.S. Gubenko

Modern theory and practice of quality management shows that risk management is an effective tool that makes it possible to achieve sustainable development, as well as reduce losses of all types. One of the significant problems in this case is risk assessment. The paper discusses issues of improving risk assessment tools. Wheelset axes are selected as the object for analysis. Input factors for risk assessment are proposed. A model has been developed for assessing risk based on the use of artificial intelligence elements. The use of the proposed model in operational practice will allow more accurate planning of repair activities based on a risk-based approach.

Key words: risk, quality management, improvement, model.

Rogov Evgeny Yuryevich, assistant, evro-evgen@yandex.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University,

Ovsyannikov Viktor Evgenievich, professor, ovsjannikovve@tyuiu.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University,

Gubenko Arseniy Sergeevich, assistant trainee, Gubenkoas@tyuiu.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University

УДК 655.222.343
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-45-46

УЛУЧШЕНИЕ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ТИПА ОСЬ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Е.Ю. Рогов, В.Е. Овсянников, А.С. Губенко

Современная ситуация требует от транспорта повышения его рабочих характеристик, прежде всего скорости и грузооборота. В этом смысле выдвигаются новые требования к конструкциям осей колесных пар, в том числе в части обеспечения и повышения долговечности. Вместе с тем, существенной проблемой, которая стоит перед ОАО «РЖД» является старение вагонного парка. Эффективное решение данных проблем требует комплексного подхода, который должен быть реализован на всем протяжении жизненного цикла изделия. В работе выполняется анализ процессов жизненного цикла деталей типа «ось колесной пары» с точки зрения обеспечения заданных показателей качества исполнительных поверхностей. В ходе анализа были выявлены основные направления (процессы), которые требуют улучшения. На основе комплексной оценки были определены рациональные параметры качества оси колесной пары, а также разработана модель системы, позволяющей обеспечивать их в авторизированном режиме при обработке на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: управление качеством, жизненный цикл, улучшение, погрешность, форма

Рассматриваемые в рамках данной работы детали – оси колесных пар относятся к классу гладкие стержни [1]. Служебное назначение для деталей данного класса заключается в передаче крутящего момента. Поэтому определяющим свойством, которое характеризует способность оси колесной пары выполнять свое служебное назначение, является долговечность [2]. Учитывая, что деталь испытывает воздействие циклических нагрузок, необходимо определить на этапе конструирования и получить при изготовлении (ремонте) оси колесной пары рациональные параметры качества, обеспечивающие сопротивление усталостному разрушению.

В практике менеджмента организации ОАО «РЖД» использует системный подход. Как один из инструментов, компания разработала руководящий документ, который рассматривает управление рисками, надежностью инфраструктуры и стоимостью [3]. В рамках данного документа, выполняется комплексный анализ формирования надежности и стоимости на всех этапах жизненного цикла. Применительно к нашему случаю наиболее важными этапами, которые влияют на долговечность оси колесной пары, являются этап конструкторской подготовки и производство (изготовление).

Можно выделить основные конструкторские способы повышения долговечности, применительно к деталям типа «ось колесной пары» [4,5]:

– замена марки материала;

– повышение диаметра;

– информационное обеспечение процесса эксплуатации.

В работе [6] было установлено, что наиболее эффективным способом является информационное обеспечение процесса эксплуатации. Однако данное мероприятие больше носит организационный характер, соответственно целесообразно рассмотреть также основные технологические методы обеспечения и повышения долговечности осей колесных пар. Можно выделить следующие технологические методы [6]:

– обработка поверхностным пластическим деформированием;

– применение специальных составов для обмазки;

– применение защитных покрытий;

– повышение механических свойств материала;

– технологическое обеспечение рациональных параметров качества поверхностного слоя и точности для посадочных поверхностей.

В работе [6] было показано, что наиболее целесообразно использовать методы, основанные на обеспечении оптимальных параметров точности и качества исполнительных поверхностей. Для более детальной проработки обозначенных проблем, необходимо проработать вопросы обеспечения долговечности на этапах жизненного цикла.

Таким образом, **цель** исследования можно определить как разработку инструментария, позволяющего в управляемом режиме обеспечивать рациональные параметры точности и качества исполнительных поверхностей на этапах изготовления и ремонта осей колесных пар.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

– комплексный анализ процессов жизненного цикла деталей типа «ось колесной пары» в части влияния на обеспечение долговечности;

– определение наиболее рациональных параметров осей колесных пар;

– разработка решений по автоматическому обеспечению требуемых параметров осей колесных пар.

Материал и методы исследования

В работе были использованы методы анализа иерархий [7], расчеты методом конечных элементов, технико-экономическая оценка, методы принятия решений, планирование и организация эксперимента, а также элементы теории искусственных нейронных сетей и нечеткой логики [8,9].

Экспериментальные исследования проводились на токарном станке с числовым программным управлением. Экспериментальные исследования проводились с варьированием значений продольной подачи и скорости резания. Акустический сигнал регистрировался при помощи датчика-акселерометра. Были использованы резцы со сменными многогранными платинами из эльбора. В качестве обрабатываемых материалов рассматривались стали с твердостью 45-50 единиц по шкале роквелла.

Измерение отклонений формы деталей в поперечном сечении выполнялось непосредственно на станке. Деталь базировалась в центрах, измерение осуществлялось с использованием индикатора часового типа. В результате измерений производилось построение круглограмм поверхностей.

Обработка результатов измерений выполнялась с использованием разработанного авторами программного обеспечения, позволяющего вычислять коэффициент взаимной корреляции, а также коэффициенты разложения в ряд Фурье. Использование преобразования Фурье при обработке результатов позволяет отсеивать погрешность установки заготовок, эксцентриситет и т.д.

Результаты исследования и их обсуждения

Жизненный цикл изделия можно представить в виде совокупности процессов. Применительно к деталям типа «ось колесной пары» цикл включает в себя следующие этапы:

1. Определение марки материала, требований к свойствам (этап А1);
2. Выполнение проектировочных расчетов (этап А2);
3. Определение номинальных и предельных размеров (этап А3);
4. Выбор метода и способа получения заготовки (этап А4);
5. Предварительная механическая обработка (этап А5);
6. Чистовая механическая обработка (этап А6);
7. Окончательная механическая обработка (этап А7);
8. Дефектование (этап А8);
9. Ремонт и восстановление (этап А9);
10. Выявление рисков (этап А10);
11. Количественная оценка рисков (этап А11);
12. Разработка программы и мероприятий по управлению рисками (этап А11).

Степень влияния каждого из этапов целесообразно выявить на основе использования метода анализа иерархий [7]. Данный метод позволяет одновременно вводить систему критериев и учитывать разную степень влияния их на цель. Иерархия процессов жизненного цикла осей колесных пар приведена на рисунке 1.

Расчет производился в программном пакете СППР «Выбор». Результаты расчетов приведены в виде гистограммы на рисунке 2.

Анализируя данные, которые приведены на рисунке 2, можно выделить этапы жизненного цикла, которые целесообразно рассматривать в дальнейшем, в качестве направлений для улучшения. Перспективным в этом отношении являются этапы, связанные с выбором параметров качества (этап А1) и этап (А7) на котором производится формирования окончательной конфигурации исполнительных поверхностей.

Рассматривая процесс обеспечения долговечности оси колесной пары, в качестве направления для совершенствования на этапе выбора параметров качества (А1) можно предложить определение рациональных параметров установочных поверхностей под опоры. Выбор производится на основе технико-экономической оценки. С технической точки зрения, необходимо обеспечить такое значение точности формы посадочной поверхности, которое позволяет получить требуемую величину контурного коэффициента трения в контакте с внутренним кольцом подшипника.

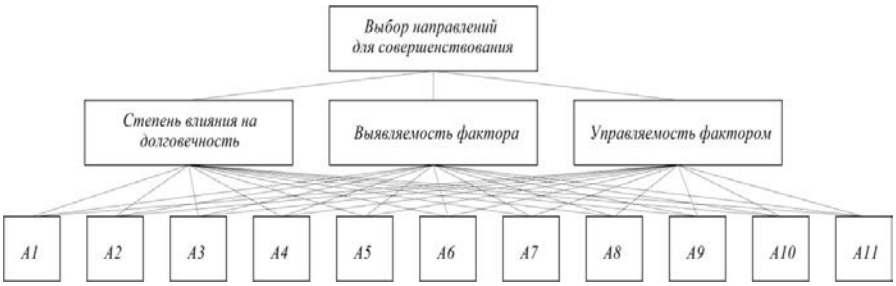


Рис. 1. Иерархия процессов жизненного цикла осей колесных пар

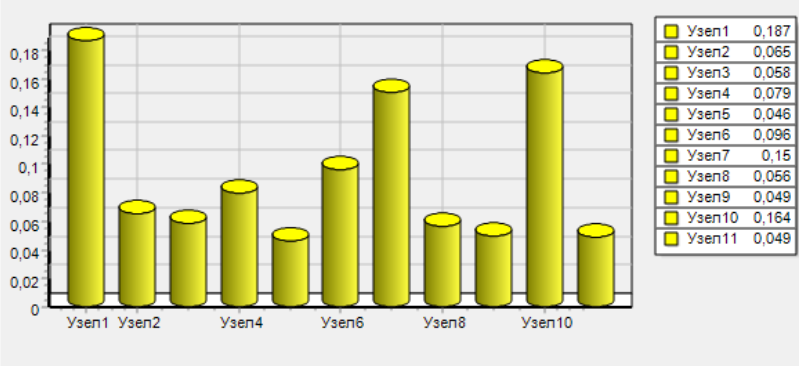


Рис. 2. Гистограмма результатов определения коэффициентов сравнения

Выражение для определения величины контурного коэффициента трения в месте посадки подшипников качения на ось колесной пары имеет вид [10]:

$$f_C = \tau_0 \cdot \left(\frac{Ac}{P_N}\right)^{\frac{1}{2\nu+1}} \left(\frac{2.35 \cdot b^{\frac{1}{2\nu}} \cdot \sigma_T \cdot R^{0.5} \cdot \left(1-\mu^2\right)}{2^{\frac{1}{2\nu}} \cdot 0.04 \cdot h_{\max}^{0.5} \cdot E} \right) + \beta \ , \qquad (1)$$

где P_N – действующее нормальное усилие; ν и b – коэффициенты, характеризующие кривую опорной поверхности; h_{max} – значение максимальной высоты микронеровностей; E – модуль Юнга; R – радиус контактирующих поверхностей; μ – коэффициент Пуассона; τ_0 – величина сопротивления материала при нагрузке на срез; A_C – значение контурной площади контакта поверхностей; β – характеристика закона трения; σ_T – величина предела текучести материала детали.

Важной характеристикой, которая входит в выражение (1), является контурная площадь. В работе были проведены исследования по оценке влияния отклонений формы посадочной поверхности на данную величину. При исследовании был использован метод конечных элементов. Пример расчета приведен на рисунке 3.

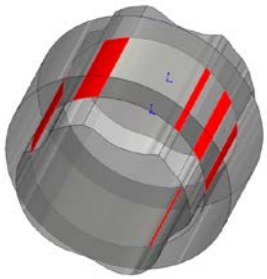


Рис. 3. Пример расчета контурной площади

Для оценки экономических аспектов, была рассчитана величина приведенных затрат в зависимости от требований к точности формы посадочных поверхностей. Методика расчета изложена в литературе [11]. На рисунке 4 приведены зависимости относительных изменений контурного коэффициента трения Δf_C и величины приведенных затрат ΔC от значения погрешности формы Δ.

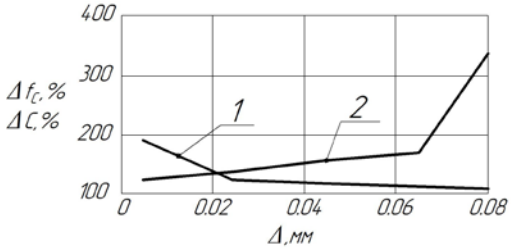


Рис. 4. Результаты расчетов: Кривая 1 – $\Delta f_C = f(\Delta)$; Кривая 2 – $\Delta C = f(\Delta)$

Из графиков видно, что ужесточение требований к точности формы вызывает стремительный рост затрат, но увеличения контурной площади не происходит. Поэтому рациональным значением отклонений формы является интервал в пределах от 0.01 до 0.02 мм.

На рисунке 5 приведен пример круглограммы поверхности после устранения погрешностей установки посредством разложения в ряд Фурье (удаляется нулевой член разложения).

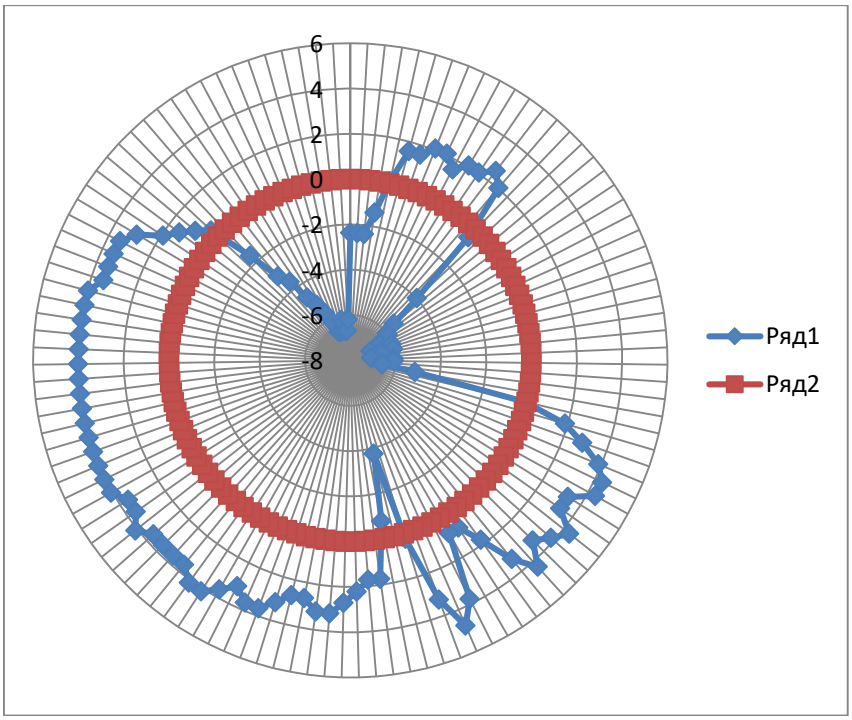


Рис. 5. Круглограмма поверхности при подаче 80 мм/мин:
Ряд 1 – прилегающая поверхность; Ряд 2 – измеренный профиль

По скорректированным круглограммам вычисляется значение среднего арифметического отклонения профиля Fa, которое является характеристикой погрешности формы посадочной поверхности оси колесной пары.

В качестве критерия для оценки погрешности формы использован коэффициент автокорреляционной функции вибросигнала в нулевой точке К(0), значения которого вычисляются по формуле [12]:

$$K_{XX}(\tau) = \frac{1}{l-\tau}\sum_{i=0}^{l-\tau} y(x)y(x+\tau)\,, \qquad (2)$$

где y – амплитуда сигнала; l – длина реализации; τ – задержка по времени (в нашем случае принимается равной нулю).

Помимо вычисления коэффициента автокорреляционной функции в нулевой точке, определялась мощность сигнала Sw.

В таблице 1 приведены значения К(0) в зависимости от подачи.

Таблица 1

Значения К(0)в зависимости от подачи

Параметры	S, мм/мим					
	20	40	60	80	100	120
К(0)	0.518	0.306	0.052	0.19	0.355	0.109

Была разработана модель для оценки и обеспечения параметров точности формы. В качестве входных переменных использованы величина коэффициента автокорреляционной функции в нулевой точке *К(0)* и мощности вибросигнала *Sw*, а выходная переменная – среднее арифметическое отклонение профиля *Fa*. При построении моде-

ли использована нечеткая логика и искусственные нейронные сети. На рисунке 6 приведены результаты тестирования точности модели.

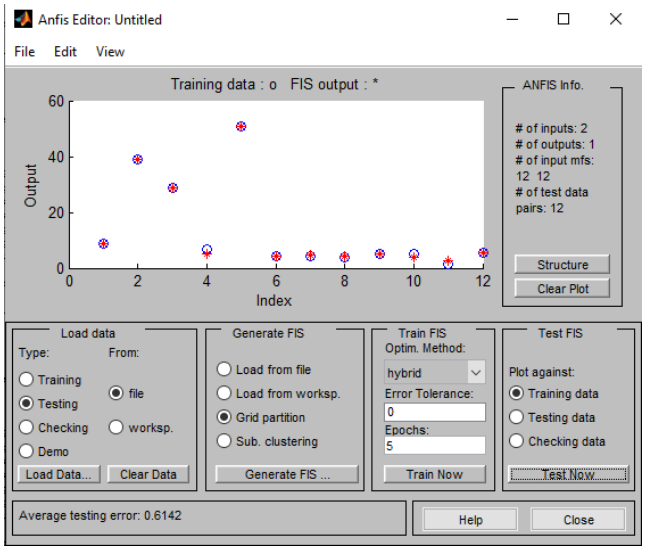


Рис. 6. Результаты тестирования модели

Также были разработаны блоки коррекции режимов обработки в зависимости от значений отклонения формы и оценки износа режущего инструмента. В целом, тестирование моделей показало, что погрешность не превышает 7 %. Разработанные модели могут быть использованы как в качестве надстройки для системы числового программного управления при автоматизированном обеспечении точности формы, так и в качестве экспертной системы для оценки и мониторинга.

Выводы:

1. В результате расчетов коэффициентов сравнения на основе метода анализа иерархий установлено, что необходимо совершенствовать этапы жизненного цикла осей колесной пары, связанные с выбором и обоснованием параметров посадочных поверхностей и последующим их обеспечением при механической обработке.

2. На основе комплексной технико-экономической оценки установлено что оптимальным значением допуска формы посадочной поверхности оси колесной пары является 0.01-0.02 мм.

3. Разработанная модель для оценки и обеспечения параметров точности формы может быть использована как в качестве надстройки для системы числового программного управления при автоматизированном обеспечении точности формы, так и в качестве экспертной системы для оценки и мониторинга. Погрешность не превышает 10 %.

Список литературы

1. Волохов Г.М, Князев Д.А. Возможный подход к нормированию рисков схода подвижного состава по причине разрушения одного из элементов колесной пары // Вестник ВЭлНИИ. 2011. № 2. С. 146–153.

2. Volokhov G.M., Timakov M.V., Protopopov A.L., Knyazev D.A. New technologies increasing operational lifecycle of wheelsets // 17th International Wheelset Congress (September 22–27, 2013, Kiev, Ukraine) / European Railway Wheels Association (ERWA); UNIFE – the European rail industry; KLW – an Interpipe brand). Part 1. P. 133–137.

3. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте [Электронный ресурс] URL: http://oac.rgotups.ru/misc/files/39.4.3.pdf (дата обращения: 10.05.2024).

4. Андреев Г.Я. Тепловая сборка колесных пар. Х: Издательство Харьковского ун-та, 1965. 227 с.

5. Ресурс и ремонтопригодность колесных пар подвижного состава железных дорог. Монография / А. А. Воробьев и др. М: Инфра-М, 2011. 264 с.

6. Смольянинов А.В., Васильев В.И., Рогов Е.Ю., Овсянников В.Е. Разработка процессной модели жизненного цикла осей колесных // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1(57). С. 90-98.

7. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

8. Заковоротный В.Л. Системный синергетический синтез управления динамикой металлорежущих станков с учётом эволюции связей / В.Л. Заковоротный [и др.]. Ростов-на-Дону: Изд. центр Дон. гос. техн. ун-та, 2008. 324 с.

9. Тугенгольд А.К., Изюмов А.И. Принципы концептуального подхода к созданию подсистемы "ИНСТРУМЕНТ" в Смарт-паспорте многооперационного станка // Вестник ДГТУ. № 2. 2014. С. 33-41.

10. Киселев Б.Р., Егоров С.А., Березин К.Г. Исследование износостойкости стальной пары трения в смазочной композиции, содержащей стеараты металлов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 7. С. 25-28.

11. Апсин В.П. Специальный курс ремонта автотранспортных средств: учебное пособие / В.П. Апсин и др. Оренбург: Изд-во ИПК ГОУ ОГУ, 2008. 172 с.

12. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных данных: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.

Рогов Евгений Юрьевич, ассистент, evro-evgen@yandex.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Овсянников Виктор Евгеньевич, профессор, ovsjannikovve@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Губенко Арсений Сергеевич, ассистент-стажер, Gubenkoas@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет

IMPROVING THE TOOLS FOR ENSURING THE QUALITY OF PARTS OF THE AXIS TYPE AT THE STAGES OF THE LIFE CYCLE

E.Yu. Rogov, V.E. Ovsyannikov, A.S. Gubenko

The current situation requires transport to improve its performance, primarily speed and cargo turnover. In this sense, new requirements are being put forward for the design of wheelset axles, including in terms of providing and increasing durability. At the same time, a significant problem facing Russian Railways is the aging of the railcar fleet. Effectively addressing these challenges requires an integrated approach that encompasses all stages of the life cycle. The paper analyzed the process of ensuring and improving the quality of parts of the "wheelset axle" type at the stages of the life cycle. During the analysis, the main directions (processes) that require improvement were identified. On the basis of a comprehensive assessment, rational parameters of the quality of the wheelset axle were determined, and a system model was developed that allows them to be provided in an authorized mode when machining on CNC machines.

Key words: quality management, life cycle, improvement, error, form.

Rogov Evgeny Yuryevich, assistant, evro-evgen@yandex.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University,

Ovsyannikov Viktor Evgenievich, professor, ovsjannikovve@tyuiu.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University,

Gubenko Arseniy Sergeevich, assistant, Gubenkoas@tyuiu.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-50-51

ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО КОМИТЕТА ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ №170 «АЭРОСТАТЫ И ДИРИЖАБЛИ»: ЭКОНОМИКО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

М.Н. Калинин, Н.М. Куприков, С.Г. Изотова

История отечественного воздухоплавания связана с развитием дирижабельной и аэростатной техники, становлением производства и формирования оборонно-промышленного комплекса СССР.

Ключевые слова: стандартизация, воздухоплавание, аэростаты, дирижабли.

В современной России развивается технологическая компетенция по созданию всей номенклатуры воздухоплавательных комплексов – носителей целевой полезной нагрузки автоматических дрейфующих аэростатов, привязных аэростатных комплексов и дирижаблей, и иной воздухоплавательной техники.

История воздухоплавания неразрывно связана с зарождением эры воздухоплавания и образованием 07.12.1931 года комбината «Дирижаблестрой». В настоящее время АО «Долгопрудненское конструкторское бюро автоматики» (АО «ДКБА») накоплен большой опыт в сфере разработки и производства аэростатных систем и комплексов, имеется современная производственно-технологическая база, а также необходимый научно-технический задел для создания перспективных аэростатов и дирижаблей на принципиально новом качественном уровне.

АО «ДКБА» является предприятием оборонно-промышленного комплекса и выполняет Государственный оборонный заказ. В настоящее время предприятием проводятся работы по созданию дирижабельной модульной транспортной системы в интересах решения перспективных задач космической деятельности Роскосмоса, а также освоения Арктической зоны Российской Федерации; привязных аэростатных комплексов для размещения целевой полезной нагрузки до 300 кг и ее вывода на рабочую высоту до 4000м для решения задач наблюдения, связи, управления и др.

В целях развития конкурентоспособности Российской Федерации в сфере воздухоплавательной тематики при разработке и производстве автоматических дрейфующих аэростатов, привязных аэростатных комплексов и дирижаблей необходима разработка национальных и международных стандартов.

В указанных условиях необходима переработка устаревших стандартов, которые в настоящее время утратили свою актуальность, а также требуется создание методических и методологических основ для структуризации и систематизации требований, предъявляемых к разработке и производству аэростатных систем и комплексов.

АО «ДКБА» в соответствии с частью 10 статьи 11 Федерального закона «О стандартизации в Российской Федерации» от 29.06.2015 №162-ФЗ провело в течение 90 дней сбор заявок от заинтересованных организаций на

участие в создании технического комитета по стандартизации. Всего поступила 21 заявка от профильных организаций.

В соответствии с Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) от 17.07.2024 № 1674 «Об организации деятельности технического комитета по стандартизации «Аэростаты и дирижабли»» организована деятельность технического комитета по стандартизации «Аэростаты и дирижабли» (далее – ТК 170).

За ТК 170 «Аэростаты и дирижабли» закреплены объекты стандартизации в соответствии с кодами:

ОК 001-2021 (ИСО МКС) «Общероссийский классификатор стандартов», утвержденного приказом Росстандарта от 19 ноября 2021 г. № 1506-ст (коды ОКС):

19.020 Условия и методика испытаний в целом (в части аэростатов и дирижаблей);

49.090 Бортовое оборудование и приборы (в части аэростатов и дирижаблей);

49.100 Оборудование наземного обслуживания и ремонта (в части аэростатов и дирижаблей).

За ТК 170 закреплены объекты стандартизации в соответствии с кодом ОК 034-2014 (КПЕС 2008) «Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности», утвержденным приказом Росстандарта от 31 января 2014 г. № 14-ст (код ОКПД 2):

30.30.20.110 Аэростаты и дирижабли.

Функции по ведению дел секретариата технического комитета по стандартизации возложены на акционерное общество «Долгопрудненское конструкторское бюро автоматики» (АО «ДКБА»).

Таблица 2

Перспективная программа для ТК «Аэростаты и дирижабли»

№	Наименование проекта документа по стандартизации
1.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Общие положения
2.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Классификация
3.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Аэростаты. Общие технические условия
4.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Дирижабли. Общие технические условия
5.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Термины и определения
6.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Материалы аэростатных оболочек. Общие технические требования
7.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Аэростаты. Разработка, производство, условия применения
8.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Дирижабли. Разработка, производство, условия применения
9.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Требования к техническому заданию
10.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Аэростаты. Методы и средства испытаний
11.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Дирижабли. Методы и средства испытаний
12.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Аэростаты. Комплектность
13.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Дирижабли. Комплектность
14.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Аэростаты. Правила приемки
15.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Дирижабли. Правила приемки
16.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Аэростаты. Правила эксплуатации
17.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Дирижабли. Правила эксплуатации
18.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Средства наземного обслуживания специального применения. Общие требования
19.	ГОСТ Р Аэростаты и дирижабли. Аппаратура бортовая аэростатная. Методы испытаний
20.	ГОСТ Р ИСО Аэростаты и дирижабли. Метеорологические аэростаты. Общие требования (аналог ISO 17717:2017 Meteorological balloons. Specification)

В состав технического комитета вошел 21 участник, в том числе, научно-исследовательские организации, предприятия промышленности, образовательные учреждения и отраслевые объединения (АО «ОПК», АО «НИИ «Вектор», ФКП «ГкНИПАС имени Л.К. Сафронова», АО «Оптрон», ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», МФТИ, Физтех, ГБПОУ МО «Физтех-колледж», ФАУ «ЦАГИ», АО «ЛИИ им. М.М. Громова», ФБУ «Нижегородский ЦСМ», ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии, АО «НЦВ Миль и Камов», ООО «РТ-Интеллектэкспорт», Институт информатики и математического моделирования им. В.А. Путилова ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», МОО «Академия военных наук», АНО Научно-информационный центр «Полярная инициатива», ФБУ «Якутский ЦСМ», ФГБУ «Институт стандартизации», ФГУП «ВНИИ «Центр»).

Создание технического комитета по стандартизации ТК 170, его работа и разработка стандартов в области воздухоплавательной техники необходимы для обновления устаревших стандартов, актуализации их содержания применительно к современному уровню технического и технологического развития воздухоплавательной техники.

Перспективная авиационная техника, включает в себя аэростаты и дирижабли:

Свободный аэростат – аэростат, перемещающийся в атмосфере вместе с воздушным потоком;

Неуправляемый аэростат – свободный аэростат, не имеющий средств управления по высоте и продолжительности полета;

Автоматический аэростат – свободный аэростат, управляемый по высоте и продолжительности полета командами от бортовой аппаратуры управления;

Пилотируемый аэростат – свободный аэростат, управляемый по высоте и продолжительности полета экипажем на борту;

Тепловой аэростат – пилотируемый аэростат, в котором в качестве несущего газа используется подогретый воздух;

Привязной аэростат – аэростат, имеющий постоянную механическую связь с аэростатным удерживающим устройством, расположенном на земле или на транспортном средстве;

Моторизованный аэростат – привязной аэростат со съемной двигательной установкой, допускающий управление полетом в вертикальной и горизонтальной плоскостях при его перебазировании;

Стратостат – свободный аэростат большого объёма для подъёма в стратосферу экипажа и аппаратуры для научных исследований;

Дирижабль мягкий – дирижабль с мягкой оболочкой, сохраняющей свою внешнюю форму и способность воспринимать внешние нагрузки за счет создаваемого внутри нее избыточного давления несущего газа;

Полумягкий дирижабль – мягкий дирижабль с короткой гондольной фермой и подвесной системой, расположенной внутри мягкой оболочки;

Полужесткий дирижабль – дирижабль с мягкой несущей оболочкой, сохраняющей свою внешнюю форму и способность воспринимать внешние нагрузки за счет килевой фермы и создаваемого внутри оболочки избыточного давления несущего газа;

Жесткий дирижабль – дирижабль, сохраняющий свою внешнюю форму и способность воспринимать внешние нагрузки за счет жесткой оболочки с подкрепляющим ее каркасом или каркаса и мягкой оболочки, находящейся под давлением несущего газа;

Гибридный дирижабль – дирижабль, у которого для создания подъемной силы используется сочетание аэростатического и аэродинамического принципов полета;

Вертостат – гибридный дирижабль вертикального взлета и посадки, у которого для создания аэродинамической подъемной силы используются вертолетные несущие винты;

Планостат – гибридный дирижабль УВП, у которого для создания аэродинамической подъемной силы используется подъемная сила корпуса или крыла, либо их комбинация в сочетании с поворотными многолопастными винтами или поворотными струйными эжекторно-вихревыми системами.

Решение представленных важнейших задач возложено на созданный технический комитет ТК 170, который должен обеспечить продвижение национальных интересов Российской Федерации в сфере воздухоплавания, в том числе в околокосмическом пространстве и на больших высотах. ТК 170 подготовлена перспективная программа работы технического комитета по стандартизации по разработке стандартов (Таблица 2).

В настоящее время отсутствуют аналоги международных технических комитетов по стандартизации ИСО.

Работа технического комитета также будет способствовать выполнению п. 102[5] Распоряжения Правительства Российской Федерации от 9 декабря 2023 г. № 3534-р, а именно разработке и реализации проектов в интересах создания дирижабельных средств транспортировки грузов массой 30-200 тонн в труднодоступных районах Арктической зоны.

Список литературы

1. Егер С.М., Матвеенко А.М., Шаталов И.А. Основы авиационной техники: учеб. /. - 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003.
2. Клягин В.А., Куприков М.Ю., Куприков Н.М. Стандартизация в авиастроении: Учебное пособие. Орёл: Издательство «Картуш», 2023. 104 с.
3. Будкин Ю.В., Куприков Н.М. Проектирование перспективной авиационной техники: стандартизация и подтверждение соответствия: Учебное пособие для подготовки бакалавров и специалистов по направлениям 24.03.04 «Авиастроение», «24.05.07 «Самолёто- и вертолётостроение», 27.03.01 «Стандартизация и метрология. Стандартизация и сертификация», 27.03.02 «Управление качеством продукции, процессов и услуг». Орёл: ООО «Картуш», 2024. 136 с.
4. Куприков Н.М. Проблемы методологии информационно-технологического сопровождения технического обслуживания и ремонта / Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков, Ю.В. Будкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 296-302. DOI 10.24412/2071-6168-2022-7-296-303.
5. Куприков Н.М. Международная Стандартная атмосфера - инструмент технологического суверенитета измерений в аэрокосмической отрасли / Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 702-713. DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-702-703.

Калинин Михаил Николаевич, канд. техн. наук, генеральный директор, Россия, Москва, АО «ДКБА»,

Куприков Никита Михайлович, канд. техн. наук, доцент, nkuprikov@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева,

Изотова Светлана Геннадьевна, начальник научно-технического отдела, Россия, Москва, АО «ДКБА»

ISSUES OF FORMATION OF THE TECHNICAL COMMITTEE FOR STANDARDIZATION 170 "BALLOONS AND AIRSHIPS": ECONOMIC AND MANAGERIAL ASPECTS

M.N. Kalinin, N.M. Kuprikov, S.G. Izotova

The history of Russian aeronautics is connected with the development of airship and balloon technology, the formation of production and the formation of the USSR military-industrial complex.

Key words: standardization, aeronautics, balloons, airships.

Kalinin Mikhail Nikolaevich, candidate of technical sciences, general director, Russia, Moscow, JSC «DKBA»,

Kuprikov Nikita Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, nkuprikov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology,

Izotova Svetlana Gennadievna, head of the scientific and technical department, Russia, Moscow, JSC «DKBA»

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-53-54

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО КОМИТЕТА ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ №171 «ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ПРОСТРАНСТВ (ДИЗАЙН ЛАБОРАТОРИЙ)»

Н.М. Куприков, Д.О. Доронин

В целях национальных интересов Российской Федерации необходимо обеспечить единство и точность измерений. Для этого на национальном и международном уровне решаются задачи по метрологии, разработка и использование эталонов разных уровней, разработка, применение и внедрение национальных стандартов в области метрологии, создание новых, точных средств измерений, в том числе с использованием искусственного интеллекта. Однако для того, чтобы использовать достижения отечественной метрологии, необходимо создать стандартные условия для проведения измерений.

Ключевые слова: стандарт, метрология, обеспечение единства измерений, ОЕИ.

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева преемствует деятельность Главной палаты мер и весов, первого в России и одного из старейших в мире государственных метрологических учреждений.

Сегодня ВНИИМ является одним из крупнейших мировых центров научной и практической метрологии, головной организацией страны по фундаментальным исследованиям в метрологии, Главным центром государственных эталонов России. Обеспечение единства измерений является важной целью в Российской Федерации.

Для этого на национальном и международном уровне решаются задачи по метрологии, разработка и использование эталонов разных уровней, разработка, применение и внедрение национальных стандартов в области метрологии, создание новых, точных средств измерений, в том числе с использованием искусственного интеллекта.

Однако для того, чтобы использовать достижения отечественной метрологии, необходимо создать стандартные условия для проведения измерений. С этой целью в 2024 году на базе ВНИИМ начал свою работу национальный технический комитет по стандартизации № 171 «Проектирование лабораторных пространств (Дизайн лабораторий)». В состав комитета вошли научные институты, центры стандартизации и метрологии, ВУЗы, лабораторные центры.

Главной задачей нового технического комитета является создание национальных стандартов (ГОСТ Р), гармонизация и контроль разработки международных стандартов ИСО. Основные направления для стандартизации: архитектурные решения, особенности планирования вентиляции, электросетей, комфорт и эргономика, мобильные лабораторные комплексы, «smart» лаборатории, виртуальные лаборатории, цифровые двойники лабораторных пространств. Кроме того, планируется разработать национальные стандарты на лаборатории специального назначения.

Технический комитет по стандартизации № 171 является «зеркальным» к международному техническому комитету ИСО № 336 «Проектирование лабораторий» (ISO/TC 336 “Laboratory design”). В настоящий момент перед членами ТК 171 стоит задача по гармонизации терминов и определений с международным сообществом.

Перспективная программа ТК 171 на 2025-2027 года

№	Наименование проекта документа по стандартизации
1	ГОСТ Р «Проектирование лабораторных пространств. Термины и определения» на основе
2	ГОСТ Р «Проектирование лабораторных пространств. Общие положения»
3	ГОСТ Р «Проектирование лабораторных пространств. Основные требования»
4	ГОСТ Р «Проектирование лабораторных пространств. Требования к инфраструктуре лабораторных пространств»
5	ГОСТ Р «Проектирование лабораторных пространств. Требования к эргономике лабораторных пространств»
6	ГОСТ Р «Проектирование лабораторных пространств. Требования к университетским (учебным) лабораториям»
7	ГОСТ Р «Проектирование лабораторных пространств. Требования к лабораториям с дистанционным управлением»

За ТК 171 «Проектирование лабораторных пространств (Дизайн лабораторий)» закреплены объекты стандартизации в соответствии с кодами:

ОК 001-2021 (ИСО МКС) «Общероссийский классификатор стандартов», утвержденного приказом Росстандарта от 19 ноября 2021 г. № 1506-ст (коды ОКС):

01.020 – «Терминология (принципы и координация)»;

01.040.07 – «Естественные и прикладные науки (Словари)»;

03.080.99 – «Услуги прочие»;

03.100.40 – «Научные исследования и разработки»;

03.120.01 – «Качество в целом»;

03.120.20 – «Сертификация продукции и фирм. Оценка соответствия»;

03.120.99 – «Качество, прочие аспекты»;

25.220.99 – «Виды обработки и покрытий прочие»;

За ТК 171 закреплены объекты стандартизации в соответствии с кодом ОК 034-2014 (КПЕС 2008) «Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности», утвержденным приказом Росстандарта от 31 января 2014 г. № 14-ст (код ОКПД 2):

72.1 – «Услуги, связанные с научными исследованиями и экспериментальными разработками в области естественных и технических наук».

Работа технического комитета также будет способствовать выполнению национальных интересов Российской Федерации в области обеспечения единства измерений и формирования современных метрологических лабораторий.

Список литературы

1. Будкин Ю.В. О реализации изменений в закон "О стандартизации в Российской Федерации" // Стандарты и качество. 2022. № 3. С. 48-49. EDN HJZSWW.
2. Куприков Н.М. Стандартизация как основа повышения конкурентоспособности экономических агентов / Н. М. Куприков, М. Ю. Куприков // Компетентность. 2021. № 8. С. 13-19. DOI 10.24412/1993-8780-2021-8-13-19. EDN RFJIXU.
3. Метрологическое образование в России: итоги и перспективы / А. Н. Пронин, Б. Я. Литвинов, М. В. Окрепилов, В. А. Слаев // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16, № 3. С. 63-69. DOI 10.20915/2687-0886-2020-16-3-63-69. EDN LJRRJJ.
4. Мантуров Д.В. Национальная стандартизация для развития экономики // Стандарты и качество. 2019. № 4. С. 88. EDN PQDWWL.
5. Применение профессиональных стандартов при формировании компетенций современного специалиста-метролога / Л. А. Конопелько, М. В. Окрепилов, А. В. Мосичкина, О. И. Палий // Альманах современной метрологии. 2023. № 1(33). С. 256-264. EDN SKQZYT.
6. Пронин А.Н. Стандарты и долгосрочные цели организации / А.Н. Пронин, М.В. Окрепилов, Б.Я. Литвинов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Международный форум: тезисы, Санкт-Петербург, 04 марта 2019 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 100-101. EDN YZVCQX.
7. Пронин А.Н. Государственный научный метрологический центр: проблемы кадрового обеспечения / А.Н. Пронин, М.В. Окрепилов, Б.Я. Литвинов // Компетентность. 2018. № 8(159). С. 39-45. EDN YQHJYD.

Куприков Никита Михайлович, канд. техн. наук, доцент, nkuprikov@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева,

Доронин Денис Олегович, аспирант, ведущий инженер по стандартизации, Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева

TOPICAL ISSUES OF THE FORMATION OF THE TECHNICAL COMMITTEE FOR STANDARDIZATION 171 "DESIGN OF LABORATORY SPACES (DESIGN OF LABORATORIES)"

N.M. Kuprikov, D.O. Doronin

For the purposes of the national interests of the Russian Federation, it is necessary to ensure the unity and accuracy of measurements. To do this, tasks on metrology are being solved at the national and international levels, the development and use of standards of different levels, the development, application and implementation of national standards in the field of metrology, the creation of new, accurate measuring instruments, including using artificial intelligence. However, in order to use the achievements of domestic metrology, it is necessary to create standard conditions for measurements.

Key words: standard, metrology, ensuring the uniformity of measurements, OEI.

Kuprikov Nikita Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, nkuprikov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology,

Doronin Denis Olegovich, postgraduate student, 1st category engineer, Russia, St. Petersburg, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-54-55

ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДКОМИТЕТА «АВИАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МОРСКИХ СУДОВ» В СОСТАВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО КОМИТЕТА ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ №005 «СУДОСТРОЕНИЕ»: ЭКОНОМИКО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

А.Н. Дергачев, Н.М. Куприков

Развитие мировой транспортной инфраструктуры способствует совершенствованию системы нормативной документации в различных формах ее представления: международные требования, федеральные правила, руководства, рекомендации и практика, стандарты (международные, национальные, отраслевые), общие технические требования и т.д. С развитием системы нормативной документации развиваются и сертификационные, удостоверяющие центры (организации), подтверждающие соответствие выпускаемой продукции, выполняемых работ и оказываемых услуг предъявляемым требованиям. В качестве решения указанных проблем единственным решением упростить порядок разработки, актуализации и гармонизации требований в области обеспечения эксплуатации вертолетов и беспилотных летательных аппаратов на морских судах – формирование требований в виде национальных стандартов.

Ключевые слова: стандартизация, технический комитет, вертолет, морское судно, ИКАО, требования, авиация, судостроение.

Развитие мировой транспортной инфраструктуры способствует совершенствованию системы нормативной документации в различных формах ее представления: международные требования, федеральные правила, руководства, рекомендации и практика, стандарты (международные, национальные, отраслевые), общие технические

требования и т.д. С развитием системы нормативной документации развиваются и сертификационные, удостоверяющие центры (организации), подтверждающие соответствие выпускаемой продукции, выполняемых работ и оказываемых услуг предъявляемым требованиям.

Значительное влияние на вновь предъявляемые или актуализируемые требования оказывает необходимость:

- обеспечения безопасности (технической, экологической и т.д.);
- повышения уровня конкурентоспособности выпускаемой продукции (предоставляемых услуг);
- подтверждения соответствия сертификационным требованиям иностранного государства (экспорт продукции или оказания услуг на территории иностранного государства);
- учета особенностей эксплуатации техники в обособленных климатических условиях и выполнения различных операций;
- гармонизации действующих национальных и межотраслевых требований;
- внедрения опережающей стандартизации;
- соблюдения основных положений международных требований и конвенций (кодексов).

Совершенствование технологий производства, условия постоянной технической конкуренции и совершенствование международных норм способствуют развитию национальной стандартизации как одному из методов повышения качества продукции (услуги).

Рассмотрим вопросы эксплуатации авиационной техники на морских судах. Данный вопрос является одним из ярких примеров тесного пересечения двух отраслей промышленности – авиации и судостроения. Ключевым фактором обеспечения безопасности и эффективности решаемых авиационной техникой задач при выполнении на морских судах взлетно-посадочных операций и доставки грузов на внешней подвеске с точки зрения нормативно-правового обеспечения является унификация требований к номенклатуре и характеристикам средств обеспечения вертолетов (беспилотных авиационных аппаратов) на морских судах.

В качестве самостоятельных объектов стандартизации авиационная и судостроительная отрасли являются самодостаточными. Имеющиеся государственные и отраслевые стандарты регламентируют разработку, изготовление, эксплуатацию продукции в целом и ее составных частей в частности.

Морское судно представляет собой комплекс элементов конструкции судна, механизмов, систем и агрегатов, каждый из которых является самостоятельным объектом стандартизации. Средства обеспечения эксплуатации вертолетов на судне являются составной частью судна, должны одновременно соответствовать требованиям судостроительной отрасли, требованиям к средствам целевого назначения (спасательные средства, средства радиосвязи, светотехническое оборудование и т.д.), а также учитывать требования авиационной и других отраслей в части касающейся.

Совокупность действующих нормативных документов в различных формах их представления (законодательные акты, своды правил, стандарты и т.д.) не обеспечивает исчерпывающую информацию, необходимую для обеспечения единой технической политики в области обеспечения эксплуатации вертолетов и беспилотных летательных аппаратов на морских судах. Помимо отсутствия отдельных требований к средствам обеспечения вертолетов на морских судах, ключевым негативным аспектом является:

- отсутствие регламентированного порядка взаимодействия предприятий различных отраслей промышленности, исполнительных органов государственной власти, различных министерств и ведомств, а также других заинтересованных организаций при создании, эксплуатации и строительстве судов различного класса и назначения, предусматривающих средства обеспечения вертолетов (беспилотных летательных аппаратов);
- процесс актуализации и гармонизации требований различных нормативных документов слишком сложный и требует колоссальных временных затрат с учетом статуса отдельных документов, ведомственной принадлежности, особенностей процедур по их актуализации и других факторов.

В качестве решения указанных проблем единственным решением упростить порядок разработки, актуализации и гармонизации требований в области обеспечения эксплуатации вертолетов и беспилотных летательных аппаратов на морских судах – формирование требований в виде национальных стандартов.

В процессе подготовки к реализации данного решения в 2022 г. проведен анализ структуры технических комитетов по стандартизации ТК-323 «Авиационная техника» [3] и ТК-005 «Судостроение» [4]. Специализация входящих в состав ТК-005 подкомитетов не охватывает специфику предъявляемых требований к обеспечению вертолетов, в то время специализация ТК-323 не предусматривает специфику требований, предъявляемых к морским судам различного назначения. АО «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова» (АО НЦВ Миль и Камов») выступило с инициативой создания специализированного подкомитета «Авиационно-технические средства морских судов» в составе ТК-005 «Судостроение», где в последующем выступило председательствующей организацией вновь созданного подкомитета. Актуальный состав указанных технических комитетов по стандартизации ТК-323 и ТК-005 представлен в таблице 1.

Структура Технических комитетов по стандартизации

Структура ТК-323 (по состоянию на 26.08.2024)	Структура ТК-005 (по состоянию на 26.08.2024)
ПК 2 «Авиационные двигатели и силовые установки»	ПК 1 «Спасение жизни и защита от пожара»
ПК 4 «Системы гидравлические и пневматические. Бытовое оборудование»	ПК 2 «Трубопроводы и механизмы»
ПК 5 «Защита бортового оборудования от внешних воздействующих факторов»	ПК-3 «Палубное оборудование и палубные механизмы»
ПК 6 «Системы жизнеобеспечения»	ПК 4 «Суда для внутренних водных путей»
ПК-9 «Детали широкого применения»	ПК 5 «Конструкция судна»
ПК-10 «Технологические процессы и оборудование»	ПК 6 «Отраслевые конструкционные материалы»
ПК-11 «Беспилотные системы»	ПК 7 «Оффшорное судостроение»
ПК-13 «Авиационные материалы»	ПК 8 «Судовое электрооборудование»
ПК-14 «Организационно-методические и общетехнические вопросы стандартизации, классификации, копирования и каталогизации»	ПК 9 «Судовое приборостроение»
ПК-17 «Конструкция самолетов и вертолетов»	ПК 10 «Судовое Машиностроение»
ПК-18 «Авионика»	ПК 11 «Информационные технологии (судостроение и эксплуатация судов). Управление жизненным циклом продукции судостроительной промышленности»

ПК-19 «Кабины, средства отображения информации, эргономика»	ПК 12 «Авиационно-технические средства морских судов» (введен в состав ТК в ноябре 2022 г. по инициативе АО «НЦВ Миль и Камов»)
ПК-20 «Электротехническое и светотехническое оборудование»	
ПК-21 «Управление жизненным циклом»	
ПК-22 «Управление качеством изделий авиационной техники»	
ПК-23 «Авиаицонные тренажеры и средства обучения»	
ПК-24 «Системы автоматизации испытаний авиационной техники»	
ПК-25 «Авиационная терминология»	
ПК-26 «Аэронавигационные системы»	
ПК-27 «Эксплуатация воздушного транспорта»	
ПК-28 «Наземное оборудование, оборудование и технологии авиатопливообеспечения»	
ПК-29 «Аэродромы»	

В рамках деятельности подкомитета «Авиационно-технические средства морских судов» ведется разработка следующих национальных стандартов:

1. Морские суда. Авиационно-технические средства морских судов. Термины и определения.
2. Морские суда. Авиационно-технические средства морских судов. Требования к обеспечению эксплуатации беспилотных авиационных систем.
3. Вертодромы и посадочные площадки для вертолетов, расположенные на акватории. Общие положения
4. Морские суда. Авиационно-технические средства морских судов. Порядок проведения испытаний
5. Морские суда. Авиационно-технические средства морских судов. Типовой объем испытаний
6. Морские суда. Авиационно-технические средства морских судов для Арктики. Общие требования
7. Морские суда. Авиационно-технические средства морских судов. Общие положения.
8. Морские суда. Авиационно-технические средства морских судов. Общие требования.
9. Морские суда. Авиационно-технические средства морских судов. Требования к обеспечению эксплуатации вертолетной техники в холодном климате высоких широт.

Принятые организационные решения позволят не только использовать опыт разработки, испытаний и эксплуатации авиационной техники, разработанной АО «НЦВ Миль и Камов», в различных условиях, в т.ч. на кораблях и морских судах, но и существенно повысить эффективность их применения при решении различных задач посредством стандартизации. Кроме того, создание подкомитета «авиационно-технические средства морских судов» является основой для эффективного и плодотворного взаимодействия межотраслевого взаимодействия в области обеспечения эксплуатации авиационной техники морских судов.

Список литературы

1. Конвенция о международной гражданской авиации, приложение 14, т. 2, издание пятое, ИКАО, Монреаль, 2020.
2. Doc 9261-AN/903. Руководство по вертодромам, издание четвертое, ИКАО, Монреаль, 2020.
3. Егер С.М., Матвеенко А.М., Шаталов И.А. Основы авиационной техники: учеб. 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003.
4. Клягин В.А., Куприков М.Ю., Куприков Н.М. Стандартизация в авиастроении: учебное пособие. Орёл: Издательство «Картуш», 2023. 104 с.
5. Будкин Ю.В., Куприков Н.М. Проектирование перспективной авиационной техники: стандартизация и подтверждение соответствия: Учебное пособие для подготовки бакалавров и специалистов по направлениям 24.03.04 «Авиастроение», «24.05.07 «Самолёто- и вертолётостроение», 27.03.01 «Стандартизация и метрология. Стандартизация и сертификация», 27.03.02 «Управление качеством продукции, процессов и услуг». Орёл: ООО Картуш, 2024. 136 с.
6. Куприков Н.М. Проблемы методологии информационно-технологического сопровождения технического обслуживания и ремонта / Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков, Ю.В. Будкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 296-302. DOI 10.24412/2071-6168-2022-7-296-303.
7. Куприков Н.М. Международная Стандартная атмосфера - инструмент технологического суверенитета измерений в аэрокосмической отрасли / Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 702-713. DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-702-703.

Дергачев Антон Николаевич, аспирант, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИУ),

Куприков Никита Михайлович, канд. техн. наук, доцент, nkuprikov@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева

PREREQUISITES FOR THE FORMATION OF THE SUBCOMMITTEE "AVIATION AND TECHNICAL MEANS OF MARINE VESSELS" AS A MEMBER OF THE TECHNICAL COMMITTEE FOR STANDARDIZATION №005 "SHIPBUILDING": ECONOMIC AND MANAGERIAL ASPECTS

A.N. Dergachev, N.M. Kuprikov

The development of the global transport infrastructure contributes to the improvement of the regulatory documentation system in various forms of its presentation: international requirements, federal rules, guidelines, recommendations and practices, standards (international, national, sectoral), general technical requirements, etc. With the development of the regulatory documentation system, certification and certification centers (organizations) are also developing, confirming the compliance of products, works performed and services provided with the requirements. As a solution to these problems, the only solution to simplify the procedure for developing, updating and harmonizing requirements in the field of ensuring the

operation of helicopters and unmanned aerial vehicles on ships is the formation of requirements in the form of national standards.

Key words: standardization, technical committee, helicopter, marine vessel, ICAO, requirements, aviation, shipbuilding.

Dergachev Anton Nikolaevich, postgraduate, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (NRU),

Kuprikov Nikita Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, nkuprikov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-57-58

ПРИНЦИП ПОЛЕТА КАК ОСНОВНОЙ КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ ПРИНЦИП ИДЕНТИЧНОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Н.М. Куприков, М.Ю.Куприков

Летательный аппарат (ЛА)– устройство преодолевающее гравитационную силу, как правило с транспортной целью, посредством альтернативных принципов полета по траектории. Ключевым классификационным признаком является принцип полета. Матрица объединяющая принципы полета и типы ЛА позволяет обеспечить удовлетворение траекторных требований использую альтернативные конструктивно-компоновочные решения/ Естественной внешней средой для современных ЛА является атмосфера Земли. Атмосфера состоит из воздуха, представляющего собой смесь газов. Воздух - среда очень неустойчивая и непостоянная. Изменение основных параметров воздуха (давления, плотности, температуры) по высоте, неодинаковое распределение солнечной радиации на земном шаре, изменяющееся и по времени года, и в течение суток, вертикальные движения воздуха приводят к тому, что в зависимости от высоты над землей, географического места и других факторов весьма различны химический состав воздуха, его электрические характеристики. В МСА за начало отсчета высоты принят уровень Мирового океана.

Ключевые слова: летательный аппарат, самолет, экраноплан, спутник, дирижабль, вертолет, ракета, атмосфера, полет, матрица.

Если исходить из определения, что Летательный аппарат это устройство преодолевающее гравитационную силу посредством альтернативных принципов полета по траектории, то используя профили полета из технического задания можно провести сборку, как в конструкторе, нового летательного аппарата как совокупности альтернативных схемных решений.

Естественной внешней средой для современных ЛА является атмосфера Земли (от греч. atmos - пар и сфера) и околоземное космическое пространство. Атмосферой принято считать область вокруг Земли, в которой газовая (воздушная) среда вращается вместе с Землей как единое целое.

Условная усредненная модель стандартной атмосферы принята международными соглашениями является среднегодовым и среднеширотным состоянием. Зачем? Для ряда инженерных расчетов летно-технических характеристик самолета, в целях их сравнимости (например, при расчете подъёмной силы и лобового сопротивления, для градуировки различных аэронавигационных приборов, в частности высотомеров).

Атмосфера состоит из воздуха, представляющего собой смесь газов. Воздух - среда очень неустойчивая и непостоянная. Изменение основных параметров воздуха (давления, плотности, температуры) по высоте, неодинаковое распределение солнечной радиации на земном шаре, изменяющееся и по времени года, и в течение суток, вертикальные движения воздуха приводят к тому, что в зависимости от высоты над землей, географического места и других факторов весьма различны химический состав воздуха, его электрические характеристики.

Необходимость сравнения результатов летных испытаний ЛА [1-6] в различных условиях привела к созданию математической модели условной атмосферы. В соответствии с этой моделью по высоте атмосфера делится на несколько слоев, внутри которых *температура изменяется по определенному закону*, довольно близко совпадающему со среднегодовыми значениями на средних широтах в летнее время (рис. 1). Это *тропосфера* (от греч. *tropos* - поворот, изменение), *стратосфера* (от лат. *stratum* - слой), *мезосфера* (от греч. *mesos* - средний, промежуточный), *термосфера* (от греч. *termē* - теплота, жар), *экзосфера* (от греч. *exō* - вне, наружу).

Сравнительно тонкие слои атмосферы, толщина которых измеряется десятками и сотнями метров, отделяющие друг от друга основные слои атмосферы, называются соответственно *тропопаузой*, *стратопаузой*, *мезопаузой*.

Единая для всех государств международная стандартная атмосфера - условная атмосфера, в которой распределение давления по высоте в поле силы тяжести получается при определенных предположениях о распределении температуры по вертикали из барометрической формулы

$$p_H = p_0 \cdot \exp\left(-Mgh/RT\right),$$

где p_H - давление на высоте; p_0 - давление на уровне Мирового океана; M - молярная масса газа; g - ускорение свободного падения; R - универсальная газовая постоянная; T - температура; h - постоянная Больцмана (по имени австр. физика Л. Больцмана).

В МСА за начало отсчета высоты принят уровень Мирового океана при следующих нормальных условиях: ускорение свободного падения g_0=9,807 м/с^2; давление p_0=101325 Па (760 мм рт. ст.); плотность ρ_0=1,2257 кг/м^3 ; температура T_0=288 К (t_0 = 15°C); скорость звука a_0 = 340 м/с.

Ключевым классификационным признаком является принцип полета [1-6]

Полет основан на преодолении гравитационной силы (силы тяжести) $\vec{G} = \boldsymbol{m}\,\vec{\boldsymbol{g}}$, где $\vec{G}$ сила земного тяготения, Н; $\boldsymbol{m}$ – масса летящего тела, кг; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения, м/с^2.

Сила, преодолевающая силу тяжести, называется *подъемной силой*. В *равномерном горизонтальном установившемся полете* подъемная сила $\vec{Y}$ уравновешивает силу тяжести ($\vec{Y} = -\vec{G}$).

Принцип полета определяется тем, каким образом и за счет чего создается подъемная сила. В настоящее время техническое значение имеют следующие принципы полета:

- *баллистический* – здесь сила $\vec{Y}$ определяется силой инерции летящего тела за счет начального запаса скорости или высоты, поэтому баллистический полет называют также пассивным;

- *ракетодинамический* – здесь сила $\vec{Y}$ определяется реактивной силой за счет отбрасывания части массы летящего тела. В соответствии с законом сохранения импульса системы возникает движение при отделении от тела с какой-либо скоростью некоторой части его массы;

- *аэростатический* – здесь сила $\vec{Y}$ определяется архимедовой силой, равной силе тяжести вытесненной телом массы воздуха;

- *аэродинамический* – здесь сила $\vec{Y}$ определяется реактивной силой за счет отбрасывания вниз части воздуха, обтекающего тело при его движении, т. е. определяется силовым воздействием воздуха на движущееся тело.

При полете в атмосфере кроме силы тяжести приходится преодолевать *силу сопротивления внешней среды*. Силу, преодолевающую сопротивление внешней среды $\vec{X}$, называют *силой тяги* (*тягой*) $\vec{P}$.

В *равномерном горизонтальном установившемся полете* сила тяги $\vec{P}$ уравновешивает силу сопротивления среды ($\vec{P} = -\vec{X}$).

Силу тяги, как и подъемную силу, можно создавать различными способами.

В соответствии с реализуемым принципом полета (способом создания подъемной силы) можно провести классификацию летательных аппаратов (рис. 1).

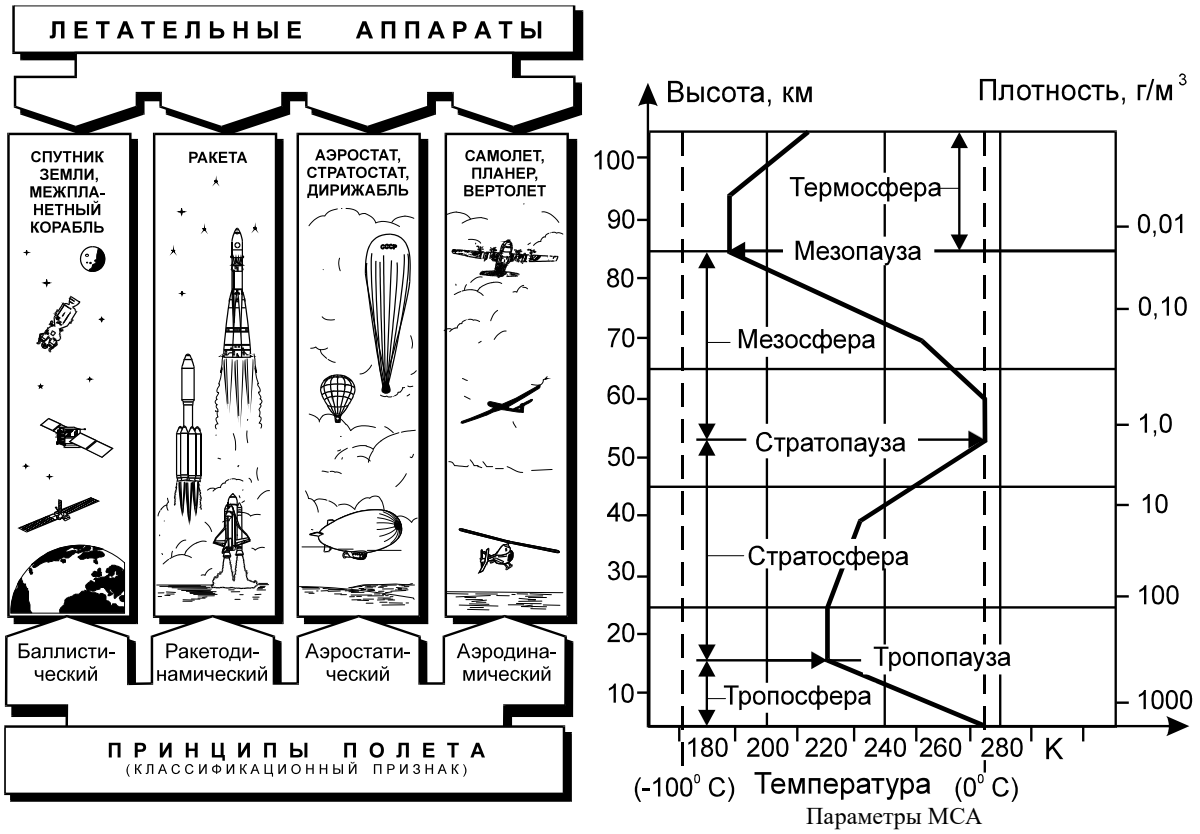


Рис. 1. Классификация летательных аппаратов по принципу полета

Реализация ракетодинамического и баллистического принципов полета[6]. По решению ООН во всем мире 12 апреля отмечается как День космонавтики. 12 апреля 1961 года *ракета-носитель* Восток вывела на орбиту искусственного спутника Земли первый в мире космический корабль Восток, пилотируемый гражданином СССР Ю.А. Гагариным.

Стартовая масса трехступенчатой *ракетно-космической системы* Восток (рис. 2) 287 000 кг. *Жидкостные реактивные двигатели* (ЖРД) боковых блоков первой ступени *1* совместно с ЖРД второй ступени *2* создавали стартовую тягу 4000 кН. Полная длина системы на старте 38 360 мм.

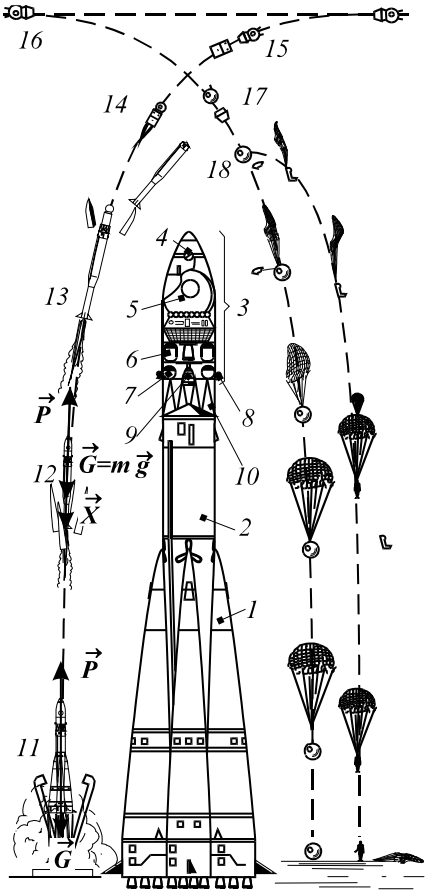


Рис. 2. К объяснению принципа полета ракеты и спутника Земли

Система вывела на околоземную орбиту полезную нагрузку (космический корабль) массой $m_{п.н}$ = 4725 кг. Третья ступень системы *3* соединена с ракетой-носителем переходной фермой *10*. Двигательный отсек третьей ступени включает в себя ЖРД *9*, двигатели системы ориентации *8*, бак *горючего* (керосин) *7* и бак *окислителя* (жидкий кислород) *6*. Установленный на вершине комплекса космический корабль Восток *5* при полете в плотных слоях атмосферы предохраняется от воздействия набегающего потока воздуха головным обтекателем *4*.

При запуске ЖРД ракетно-космической системы, стоящей на стартовой позиции *11*, газы, вытекающие из *реактивного сопла* ЖРД с большой скоростью, создают силу тяги двигателя

$$P = m_{сек}W_c + f_c(p_c - p_0),$$

где Р – сила тяги, Н; $m_{сек}$ – расход массы топлива (горючего и окислителя) в течение секунды, кг/с; W_c – скорость истечения газов из сопла, м/с; f_c – площадь выходного отверстия (среза) сопла, м^2; p_c – давление истекающих газов на срезе сопла, Па; p_0 – давление окружающей среды, Па.

При достижении силой тяги значения, равного силе тяжести, ракета отрывается от земли; с увеличением силы тяги ракета начинает подъем с ускорением. Таким образом реализуется ракетодинамический принцип полета.

После выработки топлива из баков первой ступени ее блоки отделяются (*12*), и ракета продолжает набирать высоту с ускорением. Далее производится сброс (*13*) головного обтекателя, включение двигателя третьей ступени и отделение ее (*14*) от второй ступени ракеты-носителя. После достижения первой космической скорости отделяется двигательный отсек третьей ступени, космический корабль Восток выходит на орбиту искусственного спутника Земли (*15*) и движется по баллистическому принципу только под действием сил всемирного тяготения в состоянии невесомости.

Состояние *невесомости* не означает отсутствия веса, так как именно этот вес (центростремительную силу) уравновешивает центробежная сила инерции движущегося по круговой орбите тела. Космонавт только не ощущает привычного веса (силы, с которой вследствие тяготения к Земле тело действует на опору, удерживающую его от свободного падения). На Земле ощущение веса возникает именно за счет силы реакции опоры (пола, земли, когда человек стоит; стула, когда он сидит, и т. п.).

Возвращение космического корабля Восток и космонавта на Землю происходило после включения (*16*) тормозной двигательной установки корабля, корабль начинал двигаться к Земле по траектории баллистического спуска (*17*) с торможением в атмосфере. На высоте порядка 7 км отделялась (отстреливалась) крышка люка возвращаемого аппарата, через 2 с космонавт катапультировался (*18*), и далее происходил раздельный спуск возвращаемого аппарата и космонавта с последовательным вводом в поток воздуха сначала тормозных, а затем основных парашютов.

Нетрудно заметить, что *весовая отдача* ракетно-космических систем (*отношение массы полезной нагрузки к стартовой массе аппарата*) очень мала. Это вызвано колоссальными расходами топлива для создания подъемной силы. Ракетодинамический принцип, единственно возможный для выведения ЛА на орбиту, является весьма неэкономичным для обеспечения полетов в атмосфере Земли, хотя в плотных слоях атмосферы возможен полет аппарата, реализующего и ракетодинамический, и баллистический принципы полета.

Здесь следует отметить, что движение аппаратов в космическом пространстве возможно не только по ракетодинамическому и баллистическому (под действием сил всемирного тяготения) принципам полета. Реально использование *солнечного паруса* – устройства (например, в виде металлизированной пленки-паруса), обеспечивающего перемещение космического аппарата световым давлением солнечных лучей (солнечного ветра).

Реализация аэростатического принципа полета [1]. 6 мая 1937 года после трехсуточного трансатлантического перелета на летном поле в Лейкхорсте под Нью-Йорком потерпел катастрофу германский дирижабль Гинденбург, гигантский воздушный корабль длиной около 250 м, объемом 190 000 м^3, с четырьмя дизельными двигателями мощностью по 810 кВт, с 25 каютами, ресторанами, салонами и библиотекой на борту. Около ста пассажиров и членов экипажа погибли во время катастрофы в результате возгорания, а затем взрыва водорода, которым была наполнена оболочка дирижабля.

Практически во всем мире после этой катастрофы были прекращены попытки применить *дирижабль* (от франц. *dirigeable* – управляемый) в качестве пассажирского воздушного транспорта (так называемый «синдром “Гинденбурга”»).

На долгие годы был сдан в архив самый экономичный в энергетическом смысле способ создания подъемной силы $\vec{Y}$ в атмосфере за счет реализации аэростатического принципа.

При полете дирижабля (рис. 3) *аэростатическая подъемная сила* $\vec{Y}$ уравновешивает силу тяжести дирижабля $\vec{G}$, а сила тяги двигателей $\vec{P}$ – силу лобового сопротивления $\vec{X}$ (и силу инерции при полете дирижабля с ускорением).

Подъемная (*архимедова,* выталкивающая) сила аэростатических ЛА, которые принято называть аппаратами легче воздуха, в соответствии с законом Архимеда (по имени древнегреческого ученого)

$$\boldsymbol{Y = W \rho_в g},$$

где $\boldsymbol{W}$ – объем газонаполненной оболочки аппарата, м^3; $\boldsymbol{\rho_в}$ – плотность воздуха, вытесняемого дирижаблем, кг/ м^3; $\boldsymbol{g}$ – ускорение свободного падения, м/с^2.

Запишем силу тяжести дирижабля в виде

$$\boldsymbol{G = m_0 g = (m_A + W \rho_г) g},$$

где $\boldsymbol{m_0}$ – взлетная масса дирижабля; $\boldsymbol{m_A}$ – масса аппарата, определяемая как сумма масс полезной нагрузки, различного оборудования, силовой установки, топлива, конструкции (в том числе и наполняемой газом оболочки объемом $\boldsymbol{W}$); $\boldsymbol{W \rho_г}$ – масса заполняющего оболочку газа, имеющего плотность $\boldsymbol{\rho_г}$.

Необходимая для уравновешивания силы тяжести дирижабля подъемная сила $\boldsymbol{Y = W \rho_в g = (m_A + W \rho_г) g}$.

Отсюда $\boldsymbol{(\rho_в - \rho_г) W g = m_A}$.

То есть для того, чтобы дирижабль с массой $\boldsymbol{m_A}$ смог совершать полет, необходимо, чтобы плотность газа, заполняющего оболочку, была меньше плотности воздуха. Необходимый для полета объем газонаполненной оболочки

$$W = \frac{m_A}{(\rho_{‰} - \rho_{‹})g}.$$

Напомним, что плотность воздуха (на уровне моря при температуре 0 °С) $\boldsymbol{\rho_в}$ =1,29 кг/м^3. Для заполнения оболочки обычно используется водород ($\boldsymbol{\rho_г}$ = 0,09 кг/ м^3) или гелий ($\boldsymbol{\rho_г}$ = 0,179 кг/ м^3). Можно также заполнять оболочку подогретым воздухом, плотность которого будет меньше плотности воздуха, окружающего ЛА.

В период Второй мировой войны в США возникла потребность долговременного патрулирования океанских акваторий с целью организации противолодочной обороны, и эту задачу с успехом решали дирижабли, которые входили в состав военно-морских сил до 1961 года.

Быстрое истощение запасов углеводородного топлива на нашей планете и появление принципиально новых транспортных задач побудили проектировщиков с начала 70-х годов вновь обратиться к использованию аэростатического принципа полета.

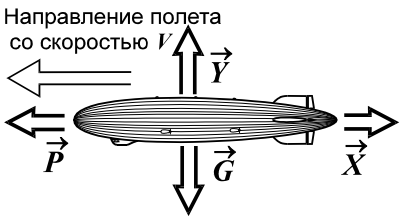


Рис. 3. К объяснению аэростатического принципа полетаобъяснению аэростатического принципа полета

Реализация аэродинамического принципа полета [2-5]. Аэродинамический принцип создания подъемной силы (отбрасывание вниз части воздуха) можно технически реализовать либо за счет движения всего аппарата, снабженного *неподвижной несущей поверхностью* (крыло), либо за счет движения отдельных несущих частей аппарата (несущий винт, вентилятор и т. д.) относительно воздушной среды. И в том и в другом случае образование подъемной силы основано на законе механики о количестве движения (второй закон Ньютона, по имени английского математика, механика, астронома и физика И. Ньютона):

$$\boldsymbol{m(V_2 - V_1) = Pt},$$

где $\boldsymbol{m}$ – масса тела (в данном случае это масса отбрасываемого воздуха), кг; $\boldsymbol{V_2 - V_1}$ – изменение скорости тела (в данном случае вертикальная скорость отбрасываемого несущей поверхностью воздуха), м/с; $\boldsymbol{P}$ – сила, приложенная к воздуху и направленная вниз, Н; $\boldsymbol{t}$ – время действия силы, с.

Следовательно, $\boldsymbol{P = m(V_2 - V_1)/t}$.

В соответствии с третьим законом Ньютона подъемная сила $\boldsymbol{Y}$ будет приложена к несущей поверхности и направлена вверх (против силы $\boldsymbol{P}$, приложенной к воздуху и направленной вниз):

$$\vec{Y} = -\vec{P}.$$

В дальнейшем при обозначении сил, имеющих аэродинамическую природу, будем применять индекс ***a*** (***Ya***, ***Xa***).

Подробно механизм возникновения аэродинамической подъемной силы будет рассмотрен в разделе 5.2. Здесь еще раз подчеркнем, что движущаяся в воздухе несущая поверхность, создающая подъемную силу ***Ya***, совершает работу по преодолению действующей на нее силы лобового сопротивления ***Xa***. Поэтому для создания подъемной силы необходимо затрачивать энергию.

Очевидно, что энергетические затраты ЛА, использующего аэродинамический принцип полета, будут тем меньше, чем меньше будет сила лобового сопротивления ***Xa***, возникающая при создании необходимой для полета подъемной силы ***Ya***, т. е. чем больше будет значение *аэродинамического качества* ЛА, определяемого отношением подъемной силы к силе лобового сопротивления:

$$K_a = Y_a / X_a.$$

Далее будет показано, что аэродинамическое качество является свойством ЛА, определяемым в основном его геометрическими параметрами.

Среди ЛА, реализующих аэродинамический принцип полета, наибольшее распространение получили *планеры* (франц. *planeur*, от *planer* – парить), самолеты и вертолеты.

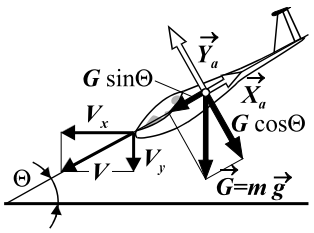


Рис. 4. К объяснению планирующего полета

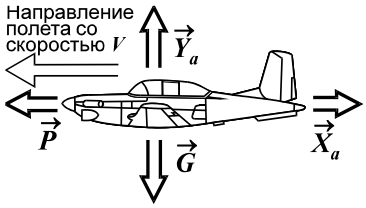


Рис. 5. Силы, действующие на самолет в горизонтальном полете

Планер не имеет силовой установки, поэтому его полет (рис. 4) в спокойной атмосфере возможен только с постоянным снижением под некоторым углом **Θ** к горизонту со скоростью планирования ***V***, которая может быть представлена векторной суммой скорости снижения V_y и горизонтальной скорости полета V_x. Движение планера вперед происходит под действием составляющей $G\sin\Theta$ силы тяжести $\vec{G}$, которая уравновешивает силу лобового сопротивления $\vec{X}_a$, возникающую вместе с подъемной силой крыла $\vec{Y}_a$, уравновешивающей составляющую $G\cos\Theta$ силы тяжести. Таким образом, при полете планера на создание подъемной силы и преодоление силы лобового сопротивления с потерей высоты расходуется потенциальная энергия, которой обладал планер, доставленный на высоту начала планирования с помощью наземной лебедки или *самолета-буксировщика*.

Увеличить запас энергии для полета планер может, набирая высоту за счет энергии □*термиков*□ □ восходящих потоков теплого воздуха.

Рассматривая схему сил, действующих на планер при планировании (см. рис. 4), запишем:

$$Y_a = G\cos\Theta;\ \ X_a = G\sin\Theta.$$

Отсюда $\mathrm{tg}\Theta = X_a/Y_a = 1/K_a$, т. е. планер, имеющий большее аэродинамическое качество, будет планировать по более пологой траектории и дальность полета его при прочих равных условиях будет больше, следовательно, он более эффективно использует начальный запас энергии. Для современных планеров аэродинамическое качество $K_a = 40\div50$.

Самолет совершает полет в атмосфере за счет силы тяги, создаваемой силовой установкой, и подъемной силы, создаваемой неподвижным относительно других частей самолета крылом.

Двигатель самолета создает силу тяги воздушным винтом или реакцией струи выхлопных газов, расходуя при этом химическую энергию топлива, находящегося в топливных баках, на совершение работы против сил аэродинамического сопротивления или сопротивления трения при разбеге самолета по ВПП на взлете.

При полете самолета со скоростью ***V*** (рис. 5) возникает подъемная сила $\vec{Y}_a$, противостоящая гравитационной силе (силе тяжести) $\vec{G}$; вместе с тем возникает и сила, оказывающая сопротивление движению самолета $\vec{X}_a$, которая преодолевается силой тяги двигателя $\vec{P}$.

Таким образом, для совершения горизонтального полета самолета необходимо выполнить условия:

$$G = Y_a;\ \ P = X_a.$$

Отсюда сила тяги двигателя, потребная для совершения горизонтального полета,

$$P_{потр} = G X_a / Y_a = G/K_a = mg/K_a.$$

Очевидно, что энергетические затраты ЛА, реализующего аэродинамический принцип полета, на преодоление силы земного тяготения существенно меньше затрат ЛА, реализующего ракетодинамический принцип полета (где $P_{потр} = mg$). У современных дозвуковых самолетов аэродинамическое качество K_a =15÷18, у сверхзвуковых самолетов K_a = 8÷12.

Однако самолет (в традиционной конфигурации) не способен совершать вертикальный взлет и посадку, поскольку неподвижное крыло создает подъемную силу только при поступательном движении самолета.

Вертолет, устаревшее название – *геликоптер* (от греч. *helix* (*helikos*) – спираль, винт и *pteron* – крыло), совершает полет за счет подъемной силы и силы тяги, создаваемых одним или несколькими *несущими винтами*, способными создавать подъемную силу без поступательного движения ЛА.

Несущий винт *1* вертолета (рис. 6, *а*) состоит из нескольких *лопастей*, которые представляют собой крылья, приводимые во вращение двигателем. За счет вращения лопастей возникает аэродинамическая подъемная сила (*сила тяги винта*) $\vec{T}_a$, которая в режиме висения уравновешивает силу тяжести $\vec{G}$ ($\vec{T}_a = -\vec{G}$).

На рис. 6, *б* показана схема сил, действующих на вертолет в горизонтальном полете. Несущий винт *1* при помощи специального устройства наклонен относительно фюзеляжа вертолета *2* вперед. Составляющая $\vec{Y}_a$ силы тяги винта $\vec{T}_a$ уравновешивает силу тяжести $\vec{G}$ ($Y_a = G$), т. е. является подъемной силой вертолета; проекция $\vec{P}_a$ силы $\vec{T}_a$ на горизонтальную ось обеспечивает поступательное движение вертолета, уравновешивая возникающую при этом силу лобового сопротивления $\vec{X}_a$ ($P_a = X_a$), т. е. является силой тяги вертолета в горизонтальном полете.

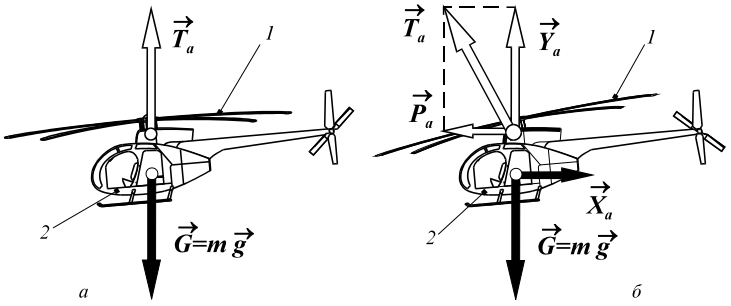


Рис. 6. К объяснению принципа полета вертолета

Аэродинамическое качество современных вертолетов K_a = 4÷5.

Практика показывает, что энергетические затраты на полет вертолета существенно больше, чем энергетические затраты на полет самолета при одинаковых взлетных массах и скорости полета.

Однако вертолет обладает существенным свойством, которого не имеют самолеты традиционных схем, – он способен совершать вертикальный взлет, посадку и находиться в режиме висения.

Летательные аппараты, реализующие несколько принципов полета. Классификация летательных аппаратов по принципам полета, приведенная выше, весьма условна. Так, ракета, выводящая спутник на околоземную орбиту, сочетает ракетодинамический принцип полета на начальном (активном) участке с баллистическим принципом на пассивном участке. Самолет-лаборатория, двигаясь по баллистической траектории, обеспечивает кратковременную (30–40 с) невесомость для тренировки космонавтов. В последнее время большое внимание уделяется созданию самолетов, базирующихся на малоразмерных ВПП. *Самолеты вертикального взлета и посадки* (СВВП) используют направленную вертикально силу тяги воздушных винтов или реализуют ракетодинамический принцип (силу тяги реактивных двигателей) на режимах вертикального взлета и посадки, а на крейсерских режимах – аэродинамический принцип. Самолеты *короткого* (СКВП) или *укороченного* (СУВП) *взлета и посадки* на взлетно-посадочных режимах преодолевают силу тяжести за счет подъемной силы крыла и вертикальной силы тяги двигателей, реализуя одновременно аэродинамический и ракетодинамический принципы полета.

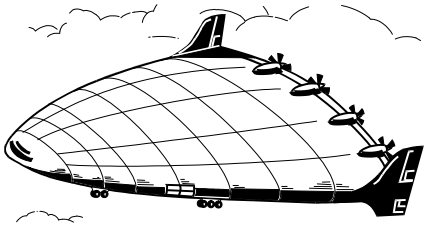


Рис. 7. Проект комбинированного летательного аппарата

В связи с новыми достижениями науки и технологии появилась возможность создания самолетов, сочетающих аэродинамический и аэростатический принципы полета. ЛА «Эйрон-340» (рис.7), проект которого разрабатывался в США, представляет собой горизонтально взлетающий аппарат, корпус которого способен создавать аэродинамическую подъемную силу при движении в атмосфере. За счет гелия, заполняющего часть корпуса, создается аэростатическая подъемная сила, компенсирующая силу веса конструкции. Аппарат рассчитан на перевозку груза массой 125 000 кг на расстояние 4000 км с крейсерской скоростью 240 км/ч на высоте 3600 м. Общая мощность четырех турбовинтовых двигателей 16 200 кВт.

Многоразовые воздушно-космические аппараты (МВКА) типа «Спейс Шаттл» (США) и «Буран» (СССР), выводимые в космическое пространство с помощью ракет-носителей, в полете по *орбите искусственного спутника Земли* (ОИСЗ) реализуют баллистический принцип полета, при маневрировании на орбите с помощью ракетных двигателей – ракетодинамический принцип, при снижении с ОИСЗ в верхних слоях атмосферы – баллистический, а в нижних, плотных слоях атмосферы – аэродинамический принципы полета.

Крылатый летательный аппарат в космическом пространстве. Надежда на положительное решение человечеством вопроса об исключительно мирном использовании космического пространства позволяет нам не касаться военных аспектов использования космических ЛА, хотя во многих технически развитых странах в этом направлении ведутся широкомасштабные работы.

В то же время непрерывно расширяется сфера использования космических ЛА для решения сугубо земных проблем:

- создание глобальной системы спутниковой радио- и телевизионной связи с непосредственным вещанием на индивидуальные антенны;
- проведение метеорологических, геодезических, картографических работ и исследование природных ресурсов;
- создание спутниковых систем навигации морского и воздушного транспорта и поиска терпящих бедствие;
- производство в условиях невесомости уникальных по свойствам неорганических и органических материалов и веществ.

Информация, получаемая из космоса, способствует интенсивному развитию производительных сил, контролю за состоянием и охране природной среды, она активно используется для нужд сельского, лесного, водного и рыбного хозяйства, океанографии, мелиорации, промышленного и гражданского строительства. Расширение этих работ требует увеличения грузопотока, направляемого на околоземные орбиты. Возникли и новые задачи, связанные с возвращением с орбиты на Землю крупногабаритных и тяжелых грузов.

Доставка с околоземной орбиты полезной нагрузки (экипажей, оборудования и т. п.) уже давно осуществляется *спускаемыми аппаратами* (СА) космических кораблей.

Спускаемые аппараты (рис. 8) *1* типа □Восток□ возвращались с орбиты по баллистической траектории, поскольку их корпус сферической формы практически не создает подъемную силу и их аэродинамическое качество близко к нулю.

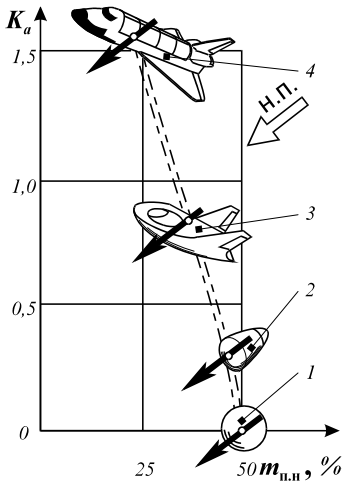


Рис. 8. К влиянию формы спускаемого аппарата на аэродинамическое качество и относительную массу полезной нагрузки

СА *2* типа Союз и Аполлон (США), имеющие форму фары, при входе в плотные слои атмосферы с аэродинамическим качеством порядка K_a = 0,1÷0,3 осуществляют «скользящий» спуск на режимах интенсивного торможения. Это позволяет достаточно точно привести их в заданную точку приземления, лежащую в плоскости орбиты ИСЗ или достаточно близкую к ней.

Применение СА с несущим корпусом *3* (K_a = 0,3÷0,6) и крылатых ЛА *4* (K_a = 1,7÷2,5) существенно увеличивает эксплуатационные возможности по транспортировке грузов, поскольку такие аппараты обеспечивают маневрирование из плоскости орбиты при планирующем спуске в атмосфере, что позволяет расширить географию мест возможной посадки.

При планирующем спуске примерно вдвое по сравнению со скользящим спуском снижается силовое воздействие на спускаемый аппарат воздушного потока и настолько уменьшается интенсивность омывающих аппарат высокотемпературных потоков воздуха, что это позволяет создать тепловую защиту, обеспечивающую возможность многократного применения крылатого ЛА для операций в космическом пространстве.

Однако относительная масса полезной нагрузки $\overline{m}_{п.н}$ (отношение массы полезной нагрузки к массе аппарата) планирующих ЛА существенно меньше, чем $\overline{m}_{п.н}$ СА скользящего спуска вследствие увеличения массы конструкции за счет крыла, оперения и существенно большей площади (и массы) теплозащитного покрытия.

Так, на МВКА Буран площадь теплозащитного покрытия превышает 1000 м^2, что почти в 100 раз больше, чем на СА Союз.

Поэтому, как показывают технико-экономические расчеты, при решении широкого комплекса задач по доставке грузов на орбиту ИСЗ и с орбиты на Землю рентабельными могут быть как способы, ставшие уже традиционными (использование одноразовых ракет-носителей и СА), так и способы, основанные на применении многоразовых ЛА, имеющих частично или полностью сохраняемые компоненты (элементы ЛА), пригодные для использования их в последующих полетах.

В общем случае МВКА (или МТКК – *многоразовый транспортный космический корабль*) можно представить как ЛА, состоящий из разгонной ступени и *воздушно-космического самолета* (ВКС).

Разгонная ступень (например, ракета-носитель) обеспечивает вывод ВКС на орбиту ИСЗ. ВКС (орбитальная ступень) производит все необходимые операции в космосе и возвращается на Землю по-самолетному.

Первыми в этом классе ЛА стали Спейс Шаттл (космический челнок, США) и комплекс Энергия Буран (СССР) (рис. 9). Почти одинаковые параметры ТЗ на проектирование орбитальных ступеней (масса и объем полезной нагрузки), одинаковые условия возвращения с ОИСЗ с *гиперзвуковой* (от греч. *hyper* – над, сверх) *скоростью,* соответствующей числам **M**=5÷25, и посадки на ВПП объективно привели к выбору практически одинаковых компоновочных решений и геометрических параметров ВКС (*ракетопланов*) Спейс Шаттл *1* и Буран *4*. Однако для комплексов в целом приняты принципиально различные технические концепции.

МВКА Спейс Шаттл – это, фактически, снабженный ускорителями *орбитальный самолет*. Космический корабль *1*, имеющий три маршевых кислородно-водородных ЖРД, крепится к внешнему топливному баку *3*, содержащему запасы жидкого водорода (горючее) и жидкого кислорода (окислитель). На внешний топливной бак крепятся также два разгонных *ракетных двигателя твердого топлива* (РДТТ) *2*, в корпусах РДТТ размещен твердый топливный заряд, горение которого обеспечивает создание силы тяги.

При вертикальном старте МВКА Спейс Шаттл необходимая для преодоления силы земного тяготения сила тяги создается одновременной работой РДТТ и маршевых ЖРД корабля, расходующих топливо из внешнего топливного бака. После выгорания топлива разгонные РДТТ отделяются от внешнего топливного бака и с помощью парашютной спасательной системы, установленной под носовым обтекателем разгонной ступени, совершают мягкое приводнение. Маршевые двигатели корабля продолжают работу до выработки топлива из внешнего бака, после чего происходит разделение корабля и бака, который, двигаясь по баллистической траектории, падает в определенном районе Атлантического океана. Специальная двигательная установка орбитального маневрирования корабля Спейс Шаттл, состоящая из двух ЖРД, работающих на самовоспламеняющихся компонентах топлива, размещенного в баках корабля (горючее – монометилгидразин, окислитель – четырехокись азота), завершает вывод корабля на орбиту. Таким образом, МВКА Спейс Шаттл (первый пилотируемый запуск корабля, названного Колумбия, состоялся 12 апреля 1981 года) имеет два компонента многоразового применения – собственно орбитальный корабль и разгонные РДТТ.

Вертикальный старт Бурана обеспечивает универсальная двухступенчатая ракета-носитель Энергия, первая ступень которой состоит из четырех ракетных блоков *5*, каждый из которых оснащен кислородно-керосиновым ЖРД. Вторая ступень *6* Энергии оснащенный четырьмя кислородно-водородными ЖРД центральный блок, на который компонуются блоки первой ступени и ВКС.

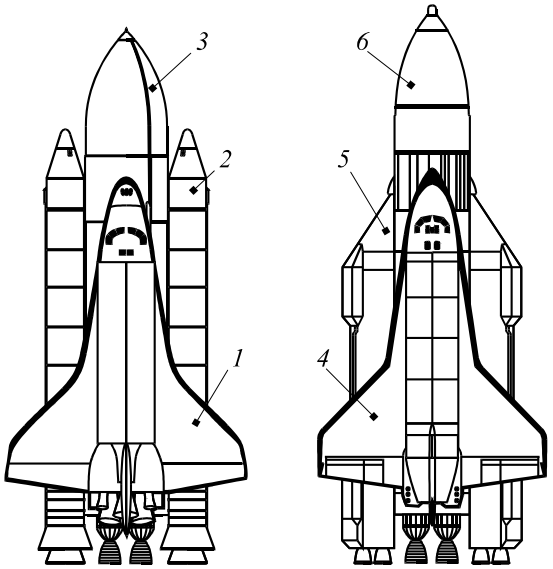


Рис. 9. МВКА первого поколения

Старт комплекса производится при работающих двигателях первой и второй ступеней. После выработки топлива из блоков первой ступени они попарно отделяются, затем происходит их разделение, они стабилизируются и осуществляют управляемый спуск в атмосфере. Отделение Бурана от второй ступени происходит, когда в расчетной точке промежуточной орбиты (суборбиты) будет достигнута заданная скорость. Включая на суборбите маршевый двигатель, Буран сначала поднимается на промежуточную, а затем на круговую опорную орбиту, а вторая ступень РН Энергия, продолжая пассивный (баллистический) полет, падает в определенном районе Тихого океана.

Таким образом, на момент первого пуска (15 ноября 1988 года) система Энергия Буран имела только один компонент многоразового применения собственно орбитальный корабль.

Блоки первой ступени РН Энергия могут оснащаться парашютно-ракетной системой спасения. Отработка РН в последующих пусках этой системы и оснащение аналогичной системой второй ступени возможный путь превращения комплекса Энергия Буран в полностью многоразовую систему.

Осуществление таких проектов МВКА, как Спейс Шаттл и Буран, потребовало, безусловно, огромных материальных затрат. Окупиться эти затраты могут лишь в процессе длительной эксплуатации таких систем.

Однако разработка, испытания и опыт их эксплуатации открывают пути для поиска новых, более экономичных разработок многоразовых космических ЛА. Очевидно, что парашютный способ спасения отдельных компонентов МВКА достаточно сложен и не обеспечивает возвращения спасаемых компонентов непосредственно на стар-

товую площадку, а это значит, что для подготовки к повторному полету потребуются значительные затраты средств и времени. Очевидно также, что повторное использование всех компонентов космической транспортной системы резко увеличивает ее экономическую эффективность. Резко увеличить экономическую эффективность можно, отказавшись от дорогостоящих сооружений стартового комплекса, обеспечивающего вертикальный старт.

Использование крылатого ЛА в качестве разгонной ступени, выводящей на орбиту ИСЗ крылатый возвращаемый аппарат, может быть достаточно серьезной альтернативой другим проектным проработкам МВКА.

Возможные проектные концепции таких МВКА проиллюстрированы рис. 10 и 11.

Пилотируемые или автоматически управляемые двухступенчатые ЛА, состоящие из дозвукового (рис. 10) или гиперзвукового (рис. 11) *самолета-разгонщика* (носителя) *1*, доставляют орбитальный ЛА *2* в расчетную точку старта с заданной высотой и скоростью полета. Аппараты проектируются под горизонтальный взлет аэрокосмического комплекса и горизонтальную посадку самолета-разгонщика на обычный аэродром, что значительно снижает расходы на его эксплуатацию. Орбитальная ступень *2*, отделяясь от самолета-разгонщика, выходит на орбиту ИСЗ и после выполнения полетного задания возвращается на аэродром старта, совершая посадку по-самолетному. В качестве дозвукового самолета-носителя для таких перспективных многоразовых аэрокосмических систем может быть использован самолет АН-225 Мрия, основные технические характеристики которого приведены в главе 20. Разработка гиперзвукового разгонщика, как и разработка орбитальных ступеней МВКА следующего поколения, связана с решением множества проблем. Среди них проблема создания таких аэродинамических форм, которые при приемлемом аэродинамическом нагреве будут обладать гиперзвуковым аэродинамическим качеством $K_a \approx 4$, что позволит при возвращении орбитальной ступени с экваториальной орбиты совершать посадку на аэродромах Европейского континента.

Высокая эффективность гиперзвуковых самолетов-разгонщиков может быть обеспечена созданием комбинированных силовых установок, работающих в режиме воздушно-реактивных двигателей (их устройство подробно рассмотрено в главе 14) при полете в атмосфере со скоростями, соответствующими числам $\mathbf{M} \leq 5$, а за пределами атмосферы в режиме ЖРД. Проектировщики, работающие над проектами МВКА следующего поколения, возлагают большие надежды на силовую установку, работающую при выведении МВКА на орбиту искусственного спутника Земли в плотных слоях атмосферы с ожижением атмосферного воздуха, т. е. с наполнением в процессе полета баков МВКА жидким кислородом, что позволяет существенно снизить стартовую массу МВКА.

Гиперзвуковой разгонщик, совершающий полет со скоростями, соответствующими $\mathbf{M}=10\div12$, может быть использован как одноступенчатый пассажирский ВКС, способный совершать полеты на высотах между границами атмосферы и ближним космосом. Перелет на таком самолете из Лондона в Сидней (Австралия) займет 45 мин, а полное время от старта до посадки, включая ожидание в воздухе при подходе к аэродрому посадки, не превысит 70 мин, в то время как продолжительность полета по этому маршруту на современном дозвуковом пассажирском самолете составляет 24 ч.

Создание крылатых ЛА, обеспечивающих работу в околоземном космическом пространстве и в верхних слоях атмосферы с гиперзвуковыми скоростями полета, позволит существенно повысить экономическую эффективность полетов, однако для реализации этих возможностей требуется проведение широкого комплекса научных и проектно-конструкторских исследований, направленных на обеспечение оптимального взаимодействия ЛА с атмосферой при гиперзвуковых скоростях полета.

* * *

Мы уже отмечали, что малая масса ЛА, малое аэродинамическое сопротивление, которое он испытывает в полете, высокая надежность всегда желательны, но получены они могут быть только за счет каких-либо других характеристик ЛА; однако при прочих равных условиях взлетная масса ЛА может служить критерием эффективности при выборе проектного решения.

Поскольку полет основан на преодолении гравитационной силы (силы тяжести), уменьшение массы любой детали, агрегата, системы, ЛА в целом – одна из основных задач, которую решают все специалисты, участвующие в разработке ЛА.

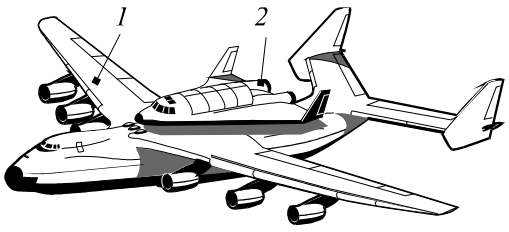


Рис. 10. Концепция МВКА с дозвуковым разгонщиком

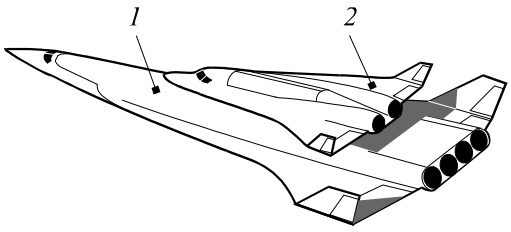


Рис. 11. Концепция МВКА с гиперзвуковым разгонщиком

В то же время созданы гигантские ЛА, реализующие различные принципы полета.

Ракетно-космическая система «Сатурн» – «Аполлон», обеспечившая в 1969–1972 годах полеты американских астронавтов на Луну, является самой большой в мире. Трехступенчатая ракета-носитель «Сатурн-5» выводила на окололунную орбиту КК «Аполлон» (масса до 47 000 кг), лунная кабина которого (масса 14 700 кг) с двумя астронавтами на борту совершала посадку на Луну. Стартовая масса системы «Сатурн» – «Аполлон» до 2 950 000 кг, сухая масса (масса без топлива) 180 000 кг, высота системы на старте 110,7 м, диаметр 10,1 м (по лопастям стабилизаторов 19,2 м).

Самым большим жестким дирижаблем было германское пассажирское воздушное судно LZ-130 «Граф Цеппелин II» (1938). Общая мощность четырех дизельных двигателей 3090 кВт. Длина 245,1 м, диаметр 41,1 м, объем 199 981 м^3. Масса конструкции 116 000 кг, аэростатическая подъемная сила 2 119 000 Н, полезная аэростатическая подъемная сила 912 300 Н.

Гигантский транспортный планер «Мессершмитт» Ме 321 (Германия, 1941) с размахом крыла 55,24 м имел грузовой отсек (длина 11 м, высота 3,3 м, ширина 3,15 м), способный вместить до 200 экипированных солдат. Взлетная масса 35 000 кг.

Самый большой самолет в мире – Ан-225 Мрия, разработанный в ОКБ им. О.К. Антонова в 1988 году, является также первым самолетом, рассчитанным на полеты при общей массе, превышающей 600 000 кг. В течение года после первого полета на этом самолете было установлено более 100 новых мировых рекордов грузоподъемности, скорости, высоты и дальности полета.

Экспериментальный двухвинтовой вертолет (1967) поперечной схемы Ми-12 (В-12) ОКБ Генерального конструктора М.Л. Миля - самый большой в мире. Полный размах лопастей двух несущих винтов 67 м, длина фюзеляжа 37 м, мощность каждого из четырех двигателей 4800 кВт. Нормальная взлетная масса вертолета 97 000 кг (максимальная – 105 000 кг), полезная (коммерческая) нагрузка до 40 000 кг.

Использование других классификационных признаков то же уместно, например: тип двигателя, количество крыльев или принцип взлета и тд

Приведенные данные, с одной стороны, характеризуют сложность проблем, поставленных в техническом задании на проектирование, а с другой – высокий научно-технический потенциал проектировщиков, сумевших преодолеть огромные гравитационные силы используя альтернативные технические решения.

Выводы:

1. Используя профили полета из технического задания можно провести сборку, как в конструкторе, нового летательного аппарата как совокупности альтернативных схемных решений.

2.Ключевым классификационным признаком является принцип полета.

3.Интеграция нескольких принципов полета позволяет реализовать новые траектории движения ЛА в рамах МСА.

Список литературы

1. Авиация. Энциклопедия. М.: Большая российская энциклопедия, ЦАГИ, 1994.

2. Егер С.М., Лисейцев Н.К. Проектирование самолетов. М.: Машиностроение, 1983.

3. Егер С.М., Лисейцев Н.К., Самойлович О.С. Основы автоматизированного проектирования самолетов. М.: Изд-во. Машиностроение, 1986.

4. Компоновка самолетов. / под ред. М.Ю. Куприкова. М.: Из-во. МАИ, 2012.

5. Егер С.М., Лисейцев Н.К., Самойлович О.С. Основы автоматизированного проектирования самолетов М.: Машиностроение, 1986.

6. Основы авиационной техники: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению «Авиа- и ракетостроение» / С.М. Егер, А.М. Матвеенко, И. А. Шаталов; под ред. И.А. Шаталова. 2. изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МАИ, 1999. 575 с.

Kuprikov Nikita Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, nkuprikov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology,

Куприков Михаил Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

THE PRINCIPLE OF FLIGHT AS THE MAIN CLASSIFICATION PRINCIPLE OF AIRCRAFT IDENTITY

N.M. Kuprikov, M.Yu. Kuprikov

An aircraft (LA) is a device that overcomes gravitational force, usually for transport purposes, through alternative flight path principles. The key classification feature is the principle of flight. The matrix combining the principles of flight and types of aircraft allows to ensure the satisfaction of trajectory requirements using alternative design and layout solutions/ The natural environment for modern aircraft is the atmosphere of the Earth. The atmosphere consists of air, which is a mixture of gases. Air is a very unstable and unstable environment. Changing the main air parameters (pressure, density, temperature) in height, the uneven distribution of solar radiation on the globe, varying both by season and during the day, vertical air movements lead to the fact that, depending on the height above the ground, geographical location and other factors, the chemical composition of the air and its electrical characteristics are very different.In the ISA for the beginning.

Key words: aircraft, airplane, ekranoplane, satellite, airship, helicopter, rocket, atmosphere, flight, matrix.

Kuprikov Nikita Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, nkuprikov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology,

Kuprikov Nikita Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, nkuprikov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Kuprikov Mikhail Yuryevich, doctor of technical sciences, professor, head of department, Russia, Saint Petersburg, Moscow Aviation Institute (National Research University)

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-67-68

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМИТЕТОВ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ В СФЕРЕ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЕЙ

Я.С. Абрамов, Н.М. Куприков

Стандартизация – деятельность государства, направленная на достижение упорядоченности в различных сферах деятельности организаций с целью содействия социально-экономическому развитию страны, улучшению качества жизни её граждан посредством увеличения качества товаров и услуг. Данная деятельность осуществима при реализации своевременной разработки и внедрении передовых технологий в соответствии с документами по их стандартизации, а также при проведении повышения уровня жизни и безопасности граждан, которые невозможны без обновления стандартов или соответствия действующим. Оптимизация и унификация различных номенклатур продукции обеспечивает сокращение её создания, снижение затрат на производство и обслуживание единицы товара. Это, в свою очередь, имеет высокую степень актуальности для авиационной и космической промышленности.

Ключевые слова: самолет, ракета, МСА, атмосфера, стандартная, технический комитет.

Введение. Целью исследования является изучение практики использования, распространения и обновления документов по стандартизации в сфере Международной стандартной атмосферы среди высокотехнологичных копаний.

Авиационная и космическая промышленность является универсальным инструментом для выполнения множества государственных задач. Так, например, гражданская авиация (гражданские самолёты, дирижабли, вертолёты и др.) выполняет огромную социальную задачу по обеспечению транспортной доступности различных регионов страны, что особенно актуально для Российской Федерации. В свою очередь военная и специальная авиация выполняет не только социальную роль по защите граждан страны, но и ряд государственных и муниципальных задач.

Проведение единой государственной политики в сфере стандартизации является одной из главных задач страны – устранение технических барьеров в промышленности, обеспечение рационального использования ресурсов, разработка, ведение, утверждение, актуализация, изменение и внедрение документов в сфере стандартизации.

Существует обширный комплекс информационных систем в сфере стандартизации, создаваемый федеральным органом исполнительной власти, обеспечивающий сбор, обработку, хранение, размещение, доступ к базе систематизированных данных в определённых сферах деятельности и предоставление информации о работе и планировании работ в сфере стандартизации. Однако для полного понимания системы стандартизации, применяемой в той или иной отрасли необходимо произвести анализ технических комитетов по стандартизации, закреплённых за ними ОКС и ОКПД2.

Технические комитеты – форма сотрудничества различных организаций и юридических лиц, организуемая федеральным органом исполнительной власти в сфере стандартизации. Их деятельность заключается в разработке документов национальной системы стандартизации, проведения экспертиз, подготовке предложений документов в сфере стандартизации.

В данной работе будут рассмотрены технические комитеты (ТК), объектом стандартизации которых является авиационная и космическая техника. Будет произведён анализ и сравнение деятельности ТК 321, ТК 323, ТК 484 и ТК 170. Для понимания рассматриваемой сферы необходимо дать несколько базовых определений и понятий для более глубокого понимания отрасли.

Основная часть. Рассмотрим принципы осуществления полёта, которые являются главным отличием между аппаратами, относящимся к различным объектам вышеуказанных технических комитетов.

Полёт (англ. Flight – полет) – движение летательного аппарата над поверхностью Земли в атмосфере или за её пределами в космическом пространстве. Другими словами, полёт представляет собой процесс преодоления силы тяжести посредством создания подъёмной. Существуют различные способы создания подъёмной силы:

1. Баллистический принцип создания подъёмной силы заключается в создании силы инерции тела за счёт начального запаса скорости или высоты. Данный принцип также называют пассивным;

2. Ракетодинамический принцип создания подъёмной силы заключается в создании реактивной силы за счёт отделения частей конструкции от аппарата. Движение возникает в соответствии с законом сохранения импульса;

3. Аэростатический принцип создания подъёмной силы заключается в создании архимедовой силы, равной силе тяжести, вытесненной телом массы воздуха;

4. Аэродинамический принцип создания подъёмной силы заключается в создании реактивной силы, появляющейся при отбрасывании части воздуха вниз. Определяется силовым воздействием воздуха на движущееся тело.

В соответствии с реализуемым принципом полета (способом создания подъемной силы) можно провести классификацию летательных аппаратов (рисунок 1).

Соответствие принципов полёта летательным аппаратам, которыми занимаются технические комитеты представлено в таблице 1.

Рассмотрение деятельности технических комитетов. ТК 321 «Ракетно-космическая техника»

На очередном совместном заседании Совета по стандартизации и общественного сокращения среднего срока разработки стандарта, активное участие в 2021 году ТК 321 занял первую строку в рейтинге самых активных технических комитетов, сокративших срок выпуска разработки стандартов.

ТК 321 «Ракетно-космическая техника» производит работы по стандартизации в области ракетно-космической техники на национальном, межгосударственном и международном уровнях. Данный комитет был основан в 1991 году. В 2017 году прошла его крупная реорганизация, произведённая в соответствии с приказом Росстандарта.

Необходимо заметить, что одним из перспективных направлений работы ТК 312 является разработка документов по стандартизации дистанционного зондирования Земли. По состоянию на 2021 год известно, что госкорпорация «Роскосмос» и ТК 321 проводят работы по разработке комплекса стандартов, определяющих требования к данным ДЗЗ и их жизненному циклу и позволяющих заложить основы придания этим данным юридической значимости.

Также ТК 321 активно занимается разработкой стандартов в таких областях создания и производства РКТ, как качество, надежность, метрологическое обеспечение, технология создания, материалы, электронная компонентная база и др., в том числе на основе международных и европейских стандартов.

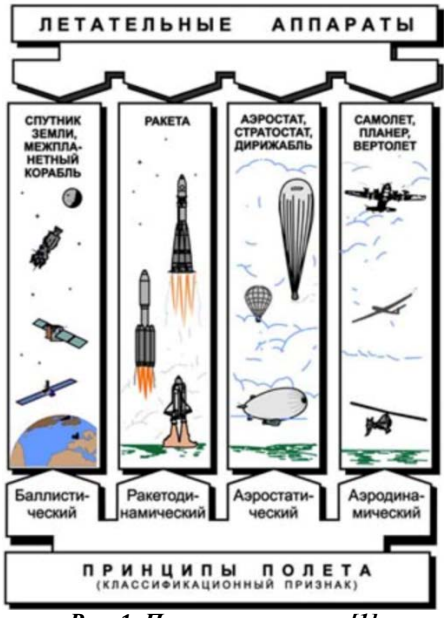


Рис. 1. Принципы полета [1]

Таблица 1

Соответствие принципов полёта летательным аппаратам

Параметры	ТК 321	ТК 323	ТК 484	ТК 170
Принцип полёта	Ракетодинамический, баллистический	Аэродинамичес-кий	Аэродина-мический, аэростати-ческий	Аэростатичес-кий
Виды ЛА	Ракетного типа, спутники	Самолётного типа, вертолёт-ного типа	Самолётного типа, стратостаты и др.	Аэростаты, стратостаты, дирижабли
Примеры ЛА	Союз ГВК, Прогресс МС, Союз МС, СКИФ-Д	Миг-31; Миг-29, Ту-160, МС-21	*	Дозор, Днепр, АН-С1, СССР-1, Аэросмена

Список подкомитетов (ПК) и организаций, входящих в состав ТК 321:

ПК 1 «Средства выведения»;

ПК 2 «Автоматические космические аппараты»;

ПК 3 «Пилотируемые космические аппараты»;

ПК 4 «Ракетные двигатели»;

ПК 5 «Системы управления;

ПК 6 «Бортовые и наземные радиотехнические системы и ЭКБЗ. Электромагнитная совместимость и защита от статического электричества»;

ПК 7 «Объекты наземной космической инфраструктуры»;

ПК 8 «Технологическое и метрологическое обеспечение РКТ;

ПК 9 «Качество, надежность, безопасность РКТ. Конструкторские нормы, требования»;

ПК 10 «Прочность, теплообмен и аэрогазодинамика РКТ»;

ПК 11 «Материалы, покрытия для РКТ» (АО «Композит»);

ПК 12 «Внешние воздействующие факторы» (НИИЯФ МГУ);

ПК 13 «Использование результатов космической деятельности»;

ПК 14 «Данные дистанционного зондирования Земли».

По положению на 2021 год за ТК 321 закреплено 94 документа национальной системы стандартизации, которые регламентируют процесс разработки, производства и эксплуатации ракетно-космической техники. Темпы разработки национальных стандартов с 2018 по 2021 год значительно увеличились

ТК 323 занимается разработкой стандартов в области авиационной техники. Данный комитет был организован взамен ликвидированного комитета 18 «Оборудование и технологии авиатоплив обеспечения» в 2017 году. Данный комитет также вошёл в десятку наиболее эффективных комитетов. В разработке на данный момент находится 73 документа.

Список подкомитетов (ПК) и организаций, входящих в состав ТК 321:

ПК 02 «Авиационные двигатели и силовые установки»;

ПК 04 «Системы гидравлические и пневматические. Бытовое оборудование»;

ПК 05 «Защита бортового оборудования от внешних воздействующих факторов»;

ПК 06 «Системы жизнеобеспечения»;

ПК 09 «Детали широкого применения»;
ПК 10 «Технологические процессы и оборудование»;
ПК 11 «Беспилотные авиационные системы»;
ПК 13 «Авиационные материалы»
ПК 14 «Организационно-методические и общетехнические вопросы стандартизации, классификации, копирования и каталогизации»;
ПК 17 «Конструкция самолетов и вертолетов»;
ПК 19 «Кабины, средства отображения информации, эргономика»;
ПК 21 «Управление жизненным циклом»;
ПК 22 «Управление качеством изделий авиационной техники»;
ПК 23 «Авиационные тренажёры и средства обучения»;
ПК 25 «Авиационная терминология»;
ПК 26 «Аэронавигационные системы»;
ПК 27 «Эксплуатация воздушного транспорта»;
ПК 28 «Наземное оборудование, оборудование и технологии авиатопливообеспечения»;
ПК 29 «Аэродромы».

ТК 484 занимается разработкой национальных и международных стандартов в области международной стандартной атмосферы. Данный ТК был создан в целях актуализации информации об атмосфере, использующейся при проектировании авиационной и космической техники. Также важным аспектом работы ТК 484 является цифровизация нормативной документации, что в свою очередь упрощает процесс проектирования.

Анализ закрепления ОКС за техническими комитетами. Анализ производится для приведённых выше ТК на двух уровнях детализации ОКС:

1. ОКС типа ** – «до разделов»;
2. ОКС типа **.***.** – «до подгруппы».

По горизонтали в таблице 2 и 3 отмечены технические комитеты, по вертикали – ОКС; соответствие ТК и ОКС отмечено в таблице заливкой ячейки на пересечении ОКС и ТК зелёным цветом, а также дублированием в этой ячейке номера ТК.

Из таблицы 2 и 3 видно, что закрепление ОКС отвечает деятельности технических комитетов, при этом все они объединены одной отраслью – авиакосмической – и соответственно объекты стандартизации схожи. Однако, деятельность этих комитетов имеет большое количество отличий. Так, например, ТК 323 имеет лишь один ОКС, а вся остальная работ ведётся по ОКПД 2. Из этого можно сделать вывод, что данный комитет в своей работе проводит статические исследования объекта стандартизации, а разделение типов объектов идёт по номенклатуре изделия, например: шины авиационные машины и оборудование и др. Использование ОКПД 2 даёт более простой анализ типов изделий, а также их участие в госзакупках и тендерах. Разработка и изготовление летательных аппаратов самолётного типа подразумевает под собой производство нескольких серий машин, при этом номенклатура изделий даже внутри одной компании может насчитывать от нескольких до десятков различных самолётов, имеющих высокую степень взаимозаменяемости агрегатов в их составе. За данным техническим комитетом закреплён ОКС 01, необходимый для формализации терминов, применяющихся в авиационной сфере, так как на сегодняшний день существует большое количество разработчиков и потребителей авиационной техники, которым необходим формализованный язык и терминология.

В свою очередь изделия, относящиеся к ТК 321 являются единичными, при этом за ним закреплено большое количество ОКС. Это объясняется удобством стандартизации изделий ракетно-космической отрасли. Помимо типичных ОКС, например, 49 «Авиационная и космическая техника», за данным техническим комитетом закреплён ОКС 33, позволяющий разрабатывать более строгие стандарты по аудио- и видеотехнике, имеющую высокую важность для ракетостроения и меньшую для авиастроения. Рассмотрев закрепление ОКС с учётом его группы и подгруппы (таблица 2), можно сделать вывод, что стандартные изделия, применяемые в авиастроении (например крепёж), также не подходят для ракетостроения. По статистике 2 из 10 стандартных изделий проходят проверку ОТК предприятия, производящего космические ракеты.

Технический комитет 170 имеет много схожего с ТК 321, так как в него входят стратостаты, поднимающиеся на высоту более 11 километров, имеющие схожее оборудование. Также при помощи аэро- и стратостатов производят испытания аппаратуры – это является одной из причин закрепления ОКС 19.

На основании вышеизложенного анализа можно сделать вывод, что технические комитеты 321, 323 и 170 имеют вертикально интегрированную структуру, которая необходима для разработки стандартов в определённой области промышленности. При общей схожести данных технических комитетов – деятельность их полярна и имеет множество отличий.

Технический комитет 484 является ярким представителем горизонтально интегрированной структуры. Исходя из данных таблицы 2 и 3 можно заметить, что закреплённые за ним ОКС так же закреплены и за остальными ТК. При этом, отличительной особенностью данного ТК является наличие ОКС 19 «Испытания», 19.020 «Условия и методики испытаний в целом». Такое закрепление необходимо для внесения в нормативные документы по испытаниям одного из самых важных и базовых в авиационно-космической отрасли типа данных – данных о международной стандартной атмосфере.

Таблица 2

Закрепление ОКС (по разделам)

Параметры	321	323	484	170
01 Общие положения. Терминология. Стандартизация. Документация		323	484	
3 Социология. Услуги. Организация фирм и управление ими. Администрация. Транспорт	321			
17 Метрология и измерения. Физические явления	321			
19 Испытания			484	170
33 Телекоммуникации. Аудио- и видеотехника	321			
35 Информационные технологии. Машины конторские			484	
49 Авиационная и космическая техника	321		484	170

Таблица 3

Закрепление ОКС (по подгруппам)

	321	323	484	170
01.040.07 Математика. Естественные науки (Словари)			484	
01.040.19 Испытания (Словари)			484	
01.040.49 Авиационная и космическая техника (Словари)		323		
03.020 Социология. Демография	321			
03.040 Труд. Занятость	321			
03.060 Финансы. Банковское дело. Денежные системы. Страхование	321			
03.080.01 Услуги в целом	321			
03.100.01 Организация фирм и управление ими в целом	321			
03.120.01 Качество в целом	321			
03.140 Патенты. Интеллектуальная собственность	321			
03.160 Законодательство. Администрация	321			
03.180 Образование	321			
03.200 Досуг. Туризм	321			
03.220.01 Транспорт в целом	321			
03.240 Почтовые услуги	321			
17.020 Метрология и измерения в целом	321			
17.040.01 Линейные и угловые измерения в целом	321			
17.060 Измерения объема, массы, плотности, вязкости	321			
17.080 Измерения времени, скорости, ускорения, угловой скорости	321			
17.100 Измерение силы, веса и давления	321			
17.120.01 Измерения параметров потока жидкости в целом	321			
17.140.01 Акустические измерения и борьба с шумами в целом	321			
17.160 Вибрации, измерения удара и вибрации	321			
17.180.01 Оптика и оптические измерения в целом	321			
17.200.01 Термодинамика в целом	321			
17.220.01 Электричество. Магнетизм. Общие аспекты	321			
17.240 Измерение излучений	321			
19.020 Условия и методики испытаний в целом			484	170
33.020 Телекоммуникации в целом	321			
33.030 Телекоммуникационные услуги. Применение	321			
33.040.01 Телекоммуникационные системы в целом	321			
33.050.01 Телекоммуникационная оконечная аппаратура в целом	321			
33.060.01 Радиосвязь в целом	321			
33.070.01 Подвижные службы в целом	321			
33.080 Цифровая сеть связи с интеграцией служб (ISDN)	321			
33.100.01 Электромагнитная совместимость в целом	321			
33.120.01 Компоненты и вспомогательные приспособления в целом	321			
33.140 Специальное измерительное оборудование для систем телекоммуникаций	321			
33.160.01 Аудио-, видео- и аудиовизуальные системы в целом	321			
33.170 Теле- и радиовещание	321			
33.180.01 Волоконно-оптические системы в целом	321			
33.200 Телемеханика. Телеметрия	321			
35.240.70 Применение информационных технологий в науке			484	
49.020 Авиационные и космические аппараты в целом			484	
49.030.01 Крепежные изделия в целом	321			
49.035 Компоненты для авиационно-космических конструкций	321			
49.040 Покрытия и связанные с ними процессы в авиационно-космической промышленности	321			
49.045 Конструкции и элементы конструкций	321			
49.050 Авиационно-космические двигатели и силовые установки	321			
49.060 Авиационно-космическое электрооборудование и системы	321			
49.080 Авиационно-космические гидравлические и пневматические системы и их компоненты	321			
49.090 Бортовое оборудование и приборы	321		484	170
49.095 Оборудование для пассажиров и кабин	321			
49.100 Оборудование наземного обслуживания и ремонта	321		484	170
49.120 Грузовое оборудование	321			
49.140 Космические системы и операции	321		484	

Из данных таблицы 4 закрепления ОКПД 2 за техническими комитетами можно сделать вывод, что при разработке документов в области стандартизации для ТК 323 основными объектами являются изделия, соответствующие каталогизации производства, например: шины, блоки электрооборудования и т.д. Таким образом, данный технический комитет достаточно сильно отличается от рассмотренных ранее комитетов, находящихся в одной отрасли.

Таблица 4

Закрепление ОКПД 2

		170 Аэростаты и дирижабли	323 Авиационная техника
22.11.13.120	Шины и покрышки пневматические для использования в авиации новые		323
22.21.29	Трубы, трубки и шланги и их фитинги прочие пластмассовые		323
26.51.1	Приборы навигационные, метеорологические, геофизические и аналогичные инструменты		323
26.51.2	Аппаратура радиолокационная, радионавигационная и радиоаппаратура дистанционного управления;		323
28.12	Оборудование гидравлическое и пневматическое силовое		323
28.99.39.110	Оборудование стартовое для летательных аппаратов		323
28.99.39.120	Устройства тормозные палубные или аналогичные		323
29.31.1	Комплекты проводов системы зажигания и прочие комплекты проводов, используемые в наземных, воздушных или водных транспортных средствах		323

30.30	Аппараты летательные и космические и соответствующее оборудование	170	323
30.30.1	Установки силовые и двигатели летательных или космических аппаратов; наземные тренажеры для летного состава, их части		323
30.30.11.000	Двигатели летательных аппаратов с искровым зажиганием		323
30.30.12	Двигатели турбореактивные и турбовинтовые, в том числе 30.30.12.110, 30.30.12.120		323
30.30.13.000	Двигатели реактивные, кроме турбореактивных, и их части		323
30.30.14.000	Тренажеры наземные для летного состава и их части		323
30.30.15.000	Части двигателей летательных аппаратов с искровым зажиганием		323
30.30.16.000	Части турбореактивных или турбовинтовых двигателей		323
30.30.20	Аэростаты и дирижабли; планеры, дельтапланы и прочие безмоторные летательные аппараты, в том числе 30.30.20.110, 30.30.20.120, 30.30.20.130, 30.30.20.190		323
30.30.3	Вертолеты и самолеты; 30.30.31 - Вертолеты, в том числе		323
42.11.10.160	Полосы взлетно-посадочные аэродромов, включая рулежные дорожки и аналогичных сооружений аэродромов, кроме зданий		323
42.11.20	Работы строительные по строительству автомагистралей, автомобильных дорог, в том числе улично-дорожной сети, и прочих автомобильных или пешеходных дорог, и взлетно-посадочных полос аэродромов (в части строительных работ по устройству взлетно-посадочных полос аэродромов, включая рулежные дорожки и перроны для летательных аппаратов)		323
43.21.10.220	Работы по монтажу систем освещения и сигнализации автомобильных дорог, аэропортов и порто		323

Заключение. Таким образом, на основании проведённого анализа можно сделать вывод о различии в подходе к стандартизации в структурах авиакосмической отрасли.

Выводы:

1.Технические комитеты, находящиеся в одной отрасли, имеют разный подход к проведению деятельности в сфере стандартизации.

2.Использование ОКС и ОКПД2 зависит от типа продукции, наиболее характерного для данной отрасли.

3.Классификация летательных аппаратов по принципу полёта имеет корреляцию с видом деятельности технического комитета в сфере стандартизации.

Список литературы

1. Егер С.М., Матвеенко А.М., Шаталов И.А. Основы авиационной техники: учебник. 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003

2. Клягин В.А., Куприков М.Ю., Куприков Н.М. Стандартизация в авиастроении: учебное пособие. Орёл: Издательство «Картуш», 2023. 104 с.

3. Будкин Ю.В., Куприков Н.М. Проектирование перспективной авиационной техники: стандартизация и подтверждение соответствия: учебное пособие для подготовки бакалавров и специалистов по направлениям 24.03.04 «Авиастроение», «24.05.07 «Самолёто- и вертолётостроение», 27.03.01 «Стандартизация и метрология. Стандартизация и сертификация», 27.03.02 «Управление качеством продукции, процессов и услуг». Орёл: ООО «Картуш», 2024. 136 с.

4. Куприков Н.М. Проблемы методологии информационно-технологического сопровождения технического обслуживания и ремонта / Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков, Ю.В. Будкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 296-302. DOI 10.24412/2071-6168-2022-7-296-303.

5. Куприков Н.М. Международная Стандартная атмосфера - инструмент технологического суверенитета измерений в аэрокосмической отрасли / Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 702-713. DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-702-703.

6. Микеладзе В.Г., Титов В.М. Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолетов и крылатых ракет. М., «Машиностроение», 1974. 152 с.

Абрамов Яков Сергеевич, студент, Россия, Москва, Московский авиационный институт (НИУ),

Куприков Никита Михайлович, канд. техн. наук, доцент, nkuprikov@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева

ANALYSIS OF THE ECONOMIC ASPECTS OF THE ACTIVITIES OF TECHNICAL COMMITTEES FOR STANDARDIZATION IN THE FIELD OF AVIATION AND ROCKET AND SPACE INDUSTRIES

Ya.S. Abramov, N.M. Kuprikov

Standardization - government activities aimed at achieving orderliness in various areas of activities of organizations in order to promote socio-economic development of the country, improve the quality of life of its citizens by increasing the quality of goods and services. This activity is feasible in the implementation of timely development and implementation of advanced technologies in accordance with documents on their standardization, as well as in the implementation of improving the standard of living and safety of citizens, which is impossible without updating standards or compliance with existing ones. Optimization and unification of various nomenclatures of products provides reduction of its creation, reduction of production and maintenance costs per unit of goods. This in turn has a high degree of relevance for the aviation and space industry.

Key words: airplane, rocket, MSA, atmosphere, standard, technical committee.

Abramov Yakov Sergeevich, student, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (NRU),

Kuprikov Nikita Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, nkuprikov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-72-73

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФОНДА ДОКУМЕНТОВ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ В СФЕРЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЫ В АВИАЦИОННОЙ ОТРАСЛИ

Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков, Д.О. Доронин, В.А.Шефлер

При проектировании ЛА все расчеты проводятся для условий Международной стандартной атмосферы (МСА), что позволяет сравнить результаты расчетов и летных испытаний нескольких летательных испытаний (ЛА), проводимых в различных климатических поясах, путем пересчета результатов испытаний на параметры международной стандартной атмосферы, «поместив» все ЛА в одинаковые условия – условия МСА. Исторически материалы для разработки международных стандартов в сфере МСА были разработаны в СССР и легли в основу международных стандартов ISO, которые в свою очередь стали основой документов ICAO 7488/3 Международной организации по гражданской авиации (ICAO) и в последствии стали государственными документами по стандартизации идентичным международным стандартам ISO. На сегодняшний день данными, представленными в соответствующих стандартах, пользуются в большом количестве отраслей, связанных с проектированием и разработкой ЛА. Тем не менее оригинальные стандарты практически не применяются: специалисты заменяют их соответствующей учебной литературой, что приводит к отсутствию единого подхода к использованию данных МСА.

Ключевые слова: самолет, МСА, атмосфера, стандартная, единство измерений, технологии, материальное обеспечение, метеорология, опрос, отрасль.

При проектировании и эксплуатации летательных аппаратов необходимо учитывать и анализировать метеорологическую обстановку. И решая обратную задачу формировать облик самолётов из условия их эксплуатации с учетом естественной и искусственной среды эксплуатации, с чем и помогает модель Стандартной атмосферы, представленная в соответствующих международных стандартах ISO 2533:1975 «Standard Atmosphere» (с дополнениями) и ISO 9662:1994 «Aircraft equipment — Environmental and operating conditions for airborne equipment — Humidity, temperature and pressure tests».

На сегодняшний день нет представления о том насколько часто используются данные стандарты в различных отраслях, связанных с проектированием и разработкой ЛА. Отсутствие информации о частоте применения стандартов может привести к отсутствию единого подхода к использованию данных МСА и потере актуальности представленных данных в силу незаинтересованности специалистов из различных областей в их применении.

В Российской Федерации на национальном уровне действуют ГОСТ 24631-81 «Атмосферы справочные. Параметры», ГОСТ 26352-84 «Модель влажности воздуха в северном полушарии», ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная. Параметры», ГОСТ Р 54084-2010 «Модели атмосферы в пограничном слое на высотах от 0 до 3000 м для аэрокосмической практики. Параметры» и ГОСТ Р 53460-2009 «Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики. Параметры». Данные стандартной атмосферы используются при проектировании, производстве, испытаниях и эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники, вооружения и т.д.

Запрос в ФГБУ «Институт стандартизации» в июле 2024 года показал, что за период с 2019 по 2024 годы из всего перечня национальных стандартов в сфере стандартной атмосферы были проданы отраслевым организациям всего 6 раз.

ГОСТ Р 54084-2010 лишь единожды приобретен в интересах применения ООО «Специальный Технологический Центр». ГОСТ 4401-81 был приобретен 5 раз АО«Московский научно-исследовательский институт „Агат“», ООО«НПП РОБИС», ООО «Инженерный Центр Программы Сиар929», ООО «Производственно-монтажное предприятие «ПРОТОН», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет».

Коллектив авторов полагает, что данные о реализации стандартов через ФГБУ «Институт стандартизации» не отражают реальную картину использования стандартов в сфере МСА в Российской Федерации.

В ходе исследования был проведен опрос представителей различных отраслей об использовании стандартов в сфере Международной стандартной атмосферы для выстраивания плана ТК484 по актуализации данных и иных мероприятий, способных повысить спрос на применение оригинальных стандартов.

В результате проведенного исследования о востребованности стандартов, путем опроса организаций авиационной и ракетно-космической отрасли, авиатранспортных предприятий, организаций оборонно-промышленного комплекса и иных организаций, имеющих отношение к авиационной технике, было выявлено 24 организации, из которых 11 организаций, использующую стандарты в области стандартной атмосферы и данные из них. Помимо этого, был также проведен опрос о готовности различных предприятий участвовать в актуализации перечисленных стандартов.

В опросе были указаны следующие стандарты:

ГОСТ 24631-81 Атмосферы справочные. Параметры;

ГОСТ 26352-84 Модель влажности воздуха в северном полушарии;

ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры;

ГОСТ Р 54084-2010 Модели атмосферы в пограничном слое на высотах от 0 до 3000 м для аэрокосмической практики. Параметры;

ГОСТ Р 53460-2009 Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики. Параметры;

ОСТ 1 00133-84 Модель атмосферы для оценки летной годности ЛА;

ОСТ 1 00276-88 Модель атмосферы северного полушария для статистической оценки характеристик ЛА и бортового оборудования;

ICAO 7488/3-1993 Manual of the ICAO Standard Atmosphere.

Результаты опроса показывают, что из всех опрошенных организаций авиационной и ракетно-космической отрасли все используют стандарты в сфере стандартной атмосферы в соответствии с профилем дея-

тельности и номенклатурой выпускаемой продукции. Однако, из-за возраста фонда стандартов и машинопечатного формата они воспринимаются, как «устаревшее наследие».

К отраслям, в которых наиболее часто находят применение перечисленным стандартам относятся отрасли разработки авиационной техники и двигателестроения, а также сертификационные центры и научные организации.

Наиболее востребованными оказались следующие стандарты:

ГОСТ 24631-81 Атмосферы справочные. Параметры;

ГОСТ 26352-84 Модель влажности воздуха в северном полушарии;

ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры;

ГОСТ Р 54084-2010 Модели атмосферы в пограничном слое на высотах от 0 до 3000 м для аэрокосмической практики. Параметры.

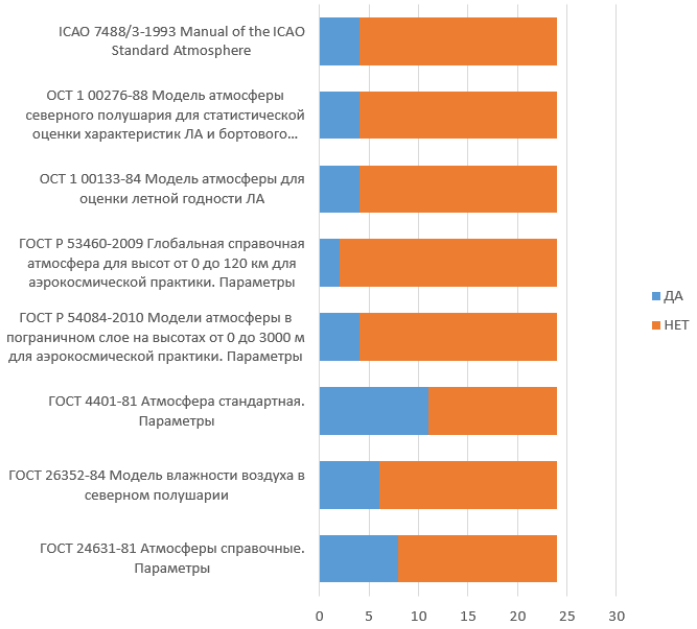


Рис. 1. Применение стандартов в сфере стандартной атмосферы

На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что в как минимум в 11 организациях применяются стандарты в сфере стандартной атмосферы, но нет официально приобретенных копий. Вместе с тем из всех опрошенных организаций лишь 6 заинтересованы в участии в актуализации представленных стандартов.

Исторически в практике деятельности организаций авиационной и ракетно-космической отрасли (например ЦАГИ) использовались технические сборники типа [7] в которых были приведены выдержки их стандартов ISO и ГОСТ для удобства использования инженерами-конструкторами. В справочнике [7] даны определения и обозначения основных геометрических и аэродинамических характеристик самолетов и некоторых типов ракет с учетом ГОСТ 22833—77 «Характеристики самолета геометрические», ГОСТ 20058—80 «Динамика летательных аппаратов в атмосфере» и новой системы символов механики полета, разработанной Международной организацией по стандартизации (ИСО). Дано сопоставление определений и обозначений, принятых в СССР, с применяемыми в Англии, Франции, ФРГ и по ИСО. Приведены также общие сведения о новых понятиях аэродинамики самолета.

Таблица 1

Применение стандартов в сфере стандартной атмосферы

Наименование организации	ГОСТ 24631-81 Атмосферы справочные. Параметры	ГОСТ 26352-84 Модель влажности воздуха в северном полушарии	ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры	ГОСТ Р 54084-2010 Модели атмосферы в пограничном слое на высотах от 0 до 3000 м для аэрокосмической практики. Параметры	ГОСТ Р 53460-2009 Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики. Параметры	ОСТ 1 00133-84 Модель атмосферы для оценки летной годности ЛА	ОСТ 1 00276-88 Модель атмосферы северного полушария для статистической оценки характеристик ЛА и бортового оборудования	ICAO 7488/3-1993 Manual of the ICAO Standard Atmosphere
АО "Авиапредприятие "Ельцовка"	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
МАИ	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Ассоциация Русский Регистр	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
АО "Ред Вингс"	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
АО "Авангард"	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
АО "Технодинамика"	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
ПАО "ОДК-УМПО"	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
ПАО "ОДК-Сатурн"	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Да	Да	Нет

АО «Вертолеты России»	Да	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
Казанский авиационный завод им.С.П.Горбунова-филиал АО Туполев	Да	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
АО "РКБ "Глобус"	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
ПАО "Яковлев"	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Акционерное общество "Смоленский авиационный завод"	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
ФКП «ГкНИПАС имени Л.К.Сафронова»	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
ПАО "ОДК-Кузнецов"	Да	Да	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да
АО "НПО "Молния"	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Филиал ПАО "Ил"-ВАСО	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
АО НПО Техномаш им. С.А. Афанасьева	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
АО «Российские космические системы»	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

Как результат инженерной практики на предприятиях имеет место самостоятельное переоформление стандартов в сфере стандартной атмосферы, что приводит к невозможности обеспечения единства измерений ввиду неумения пользования программными продуктами (Excel), несоблюдения погрешности ввиду отсутствия методики численной обработки данных в сфере стандартной атмосферы и др.

Таким образом, необходимо предпринять меры по актуализации стандартов в сфере МСА и приведению их к формату, позволяющему более эффективно использовать из для проектирования ЛА.

Выводы:

1. Рассмотренные в исследование стандарты в области МСА к настоящему моменту не пользуются достаточным спросом, что ведет к пониженному интересу к их актуализации.

2. В большой части предприятий из различных рассмотренных областей, имеющих отношение к проектированию ЛА, специалисты предпочитают пользоваться сборниками и иной научной литературой, включающей в себя данные МСА, вместо рассмотренных государственных и международных стандартов.

3. Необходимо предпринять меры по актуализации стандартов в сфере МСА и приведению их к формату, позволяющему более эффективно использовать из для проектирования ЛА.

Список литературы

1. Клягин В.А., Куприков М.Ю., Куприков Н.М. Стандартизация в авиастроении: учебное пособие. Орёл: Издательство «Картуш», 2023. 104 с.

2. Будкин Ю.В., Куприков Н.М. Проектирование перспективной авиационной техники: стандартизация и подтверждение соответствия: Учебное пособие для подготовки бакалавров и специалистов по направлениям 24.03.04 «Авиастроение», «24.05.07 «Самолёто- и вертолётостроение», 27.03.01 «Стандартизация и метрология. Стандартизация и сертификация», 27.03.02 «Управление качеством продукции, процессов и услуг». Орёл: ООО «Картуш», 2024. 136 с.

3. Kuprikov M.Yu. Modification as a method of aircraft design / M. Yu. Kuprikov, N. Kuprikov // Journal of Physics: Conference Series: III International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III-2022). Vol. 2373. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 72031. DOI 10.1088/1742-6596/2373/7/072031.

4. Куприков Н.М. Проблемы методологии информационно-технологического сопровождения технического обслуживания и ремонта / Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков, Ю.В. Будкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 296-302. DOI 10.24412/2071-6168-2022-7-296-303.

5. Куприков Н.М. Международная Стандартная атмосфера - инструмент технологического суверенитета измерений в аэрокосмической отрасли / Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 702-713. DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-702-703.

6. Kuprikov M.Y. Moment-Inertial Factor as a Criterion for Assessing the Dimension of an Aircraft / M.Y. Kuprikov, P.O. Polyakov, N.M. Kuprikov // Journal of Applied and Computational Mechanics. 2022. Vol. 8, No. 4. P. 1307-1314. DOI 10.22055/jacm.2022.39741.3455.

7. Микеладзе В.Г., Титов В.М. Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолетов и крылатых ракет. М., «Машиностроение», 4974, 152 с.

Куприков Никита Михайлович, канд. техн. наук, доцент, nkuprikov@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева,

Куприков Михаил Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Доронин Денис Олегович, аспирант, инженер 1-й категории, Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева,

Шефлер Валерия Александровна, студент, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ISSUES OF APPLICATION OF THE FUND OF DOCUMENTS ON STANDARDIZATION IN THE FIELD OF INTERNATIONAL STANDARD ATMOSPHERE IN THE AVIATION INDUSTRY

N.M. Kuprikov, M.Yu. Kuprikov, D.O. Doronin, V.A. Shefler

When designing an aircraft, all calculations are carried out for the conditions of the International Standard Atmosphere (ISA), which allows you to compare the results of calculations and flight tests of several aircraft conducted in different climatic zones by recalculating the test results for the parameters of the international standard atmosphere, "placing" all aircraft in the same conditions – ISA conditions. Historically, materials for the development of international standards in the field of ISAs were developed in the USSR and formed the basis of international ISO standards, which in turn became the basis of ICAO documents 7488/3 of the International Civil Aviation Organization (ICAO) and subsequently became state documents on standardization identical to international ISO standards. To date, the data presented in the relevant standards are used in a large number of industries related to aircraft design and development. Nevertheless, the original standards are practically not applied: specialists replace them with appropriate educational literature, which leads to the lack of a unified approach to the use of ISA data.

Key words: aircraft, MSA, atmosphere, standard, unity of measurements, technology, logistics, meteorology, survey, industry.

Kuprikov Nikita Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, nkuprikov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology,

Kuprikov Mikhail Yuryevich, doctor of technical sciences, professor, head of department, Russia, Saint Petersburg, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Doronin Denis Olegovich, postgraduate, engineer of the 1st category, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology,

Shefler Valeria Alexandrovna, student, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-75-76

РЕШЕНИЕ ВОПРОСОВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГОСУДАРСТВЕННОГО ФЛАГА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СТАНДАРТИЗАЦИИ

Н.М. Куприков, Д.О. Доронин

В целях национальных интересов Российской Федерации необходимо обеспечить единство и точность измерений при производстве государственного флага Российской Федерации и определить порядок взаимодействия заинтересованных сторон, участвующих в торгово-экономических отношениях. Недостаточное регулирование отрасли препятствует полноценному развитию этого направления экономической хозяйственной детальности. Стандарты в области производства сырья и изготовления продукции государственного флага Российской Федерации обеспечат единый подход к регулированию отрасли и создадут основу для метрологического обеспечения производства.

Ключевые слова: флаг, стандарт, метрология, символы государства, Российская Федерация, вексиллология.

Государственный флаг Российской Федерации – государственный символ Российской Федерации [1]. Государственный флаг Российской Федерации является самым тиражируемым символом, он печатается на флагах, транспарантах, визитках, вымпелах и др. При таких массовых тиражах государственного символа возникает необходимость соблюдения технологий производства, общих технических условий и обеспечения единства измерений.

В соответствии с Федеральным законом "О стандартизации в Российской Федерации" от 29.06.2015 N 162-ФЗ целью стандартизации является применение документов по стандартизации при поставках товаров, выполнении работ, оказании услуг, в том числе при осуществлении закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд.

До 2023 года в Российской Федерации действовал ГОСТ Р 51130-98 «Флаг Государственный Российской Федерации. Общие технические условия», который за 25 лет потерял актуальный научно-технический уровень. Стандарт ГОСТ Р 51130-98 был пересмотрен в связи с тем, что за период с 1998 по 2023 год произошла отмена стандартов и пересмотр иных документов по стандартизации, изменились технологии производства и материалы используемые в текстильном промышленности.

На 2022 год, когда была начата разработка в соответствии с Национальной программой стандартизации, содержание стандарта ГОСТ Р 51130-98 не соответствовало современному уровню развития науки и техники.

Проблема отсутствия нормативно-методического и метрологического обеспечения производства государственных символов (в первую очередь флагов) в Российской Федерации пока не решена, что подтверждает актуальность проведения научных исследований и разработок в данном направлении [5-18].

Метрологическое обеспечение производство государственных символов (продукции) это установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений при проведении исследований с целью обеспечения производства продукции. Целью метрологического обеспечения [2-3] является повышение качества продукции, эффективности управления производством сырья и уровня автоматизации производственных процессов. Для достижения цели метрологического обеспечения планируется использовать систему стандартных образцов свойств и признаков материа-

лов, обеспечивающую воспроизведение единиц величин, характеризующих продукции. Конечным пользователем результатов выполнения задач по метрологического обеспечению являются организации и их метрологические службы.

Национальные стандарты являются нормативно-методической подсистемой Государственной системы обеспечения единства измерения.

Для повышения качества продукции, выполнения работ, оказания услуг и повышение конкурентоспособности продукции российского производства, а именно массового производства государственного символа - Государственный флаг Российской Федерации, в 2023 году коллективом авторов был разработан совершенно новый национальный стандарт ГОСТ Р 51130-2023 «Флаги национальные. Флаг государственный Российской Федерации. Общие технические условия» [4]. ГОСТ Р 51130-2023 соответствует современному научно-техническому уровню в области стандартизации. В названии ГОСТ Р 51130-2023 был сохранен цифровой индекс для обеспечения прослеживаемости фонда документов по стандартизации.

Разработка ГОСТ Р 51130-2023 произведена для повышения качества продукции в соответствии с современным уровнем развития науки, техники и технологии, и с целью исключения ссылок на отмененные стандарты или на межгосударственные стандарты, действие которых на территории Российской Федерации прекращено в одностороннем порядке.

Рассмотренные в статье документы по стандартизации будут положены в нормативную основу для создания методик, требований, стандартных образцов и разработки будущих документов по стандартизации, удовлетворяющие требованиям отрасли в метрологическом обеспечении исследований и производство государственных символов (продукции) - Государственного флага Российской Федерации.

Список литературы

1. Федеральный конституционный закон от 25 декабря 2000 № 1-ФКЗ «О Государственном флаге Российской Федерации». М., 2000.
2. ГОСТ Р 8.000-2015 - «Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения». М., 2015.
3. ГОСТ Р 8.820-2015 - «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения». М., 2015.
4. ГОСТ Р 51130-2023 «Флаги национальные. Флаг государственный Российской Федерации. Общие технические условия». М., 2023.
5. Бушуева Л.П. Все страны мира. Все флаги и гербы / Л. П. Бушуева ; Л. П. Бушуева. Ростов-на-Дону: Владис, 2009. 512 с.
6. Бахтин В.В. 22 августа День государственного флага Российской Федерации // Рубежи истории. 2019. № 3(3). С. 3-8.
7. Василевская М.Л. Флаг Российской Федерации // Национальные приоритеты России. 2012. № 2(7). С. 126.
8. Конституция Российской Федерации: конституция РФ, государственный флаг РФ, государственный герб РФ, государственный гимн РФ. Москва: АСТ, 2006. 64 с.
9. Бутенкова Е.В. Изучение символики России на уроках английского языка в 5 классе (разработка урока "Символы России: флаг России") / Е.В. Бутенкова, М.В. Захарова // Психолого-педагогические технологии гражданского воспитания: Методическое пособие / Под научно-методическим руководством Л.Ю. Максимовой. Москва: Московский государственный областной университет, 2018. С. 45-54.
10. Герб, флаг и гимн России : изучение гос. символов Российской Федерации в школе : методические рекомендации / сост. М. К. Антошин. 2-е изд. Москва: Айрис-пресс, 2006. 73 с.
11. Емельянов К.А. Российский гимн как отражение его эпохи // Достижения и перспективы научных исследований молодежи: Материалы XXI Международной научно-практической конференции, Кумертау, 12–13 апреля 2023 года. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2023. С. 64-67. EDN CEFJAX.
12. Флаги и гербы мировых столиц: изображения, описания, история, символика / авт.-сост. К. Я. Нежинский. Москва: Эксмо, 2009.
13. Коротаев С.Л. Государственные флаги: актуальные вопросы бухгалтерского учета и налогообложения в коммерческих организациях // Бухгалтерский учет и анализ. 2020. № 2(278). С. 16-23.
14. Кузьменюк А.А. Ответственность за неправомерные действия в отношении государственных символов Российской Федерации // Морально-психологическое обеспечение деятельности органов внутренних дел: современные подходы и перспективы развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2021. С. 208-211.
15. Медведева В.А. Патриотическая символика современной России // Проблемы современной педагогики: теория и практика. Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2016. С. 196-198.
16. Мусаев А. Исторические флаги: значение, особенности и история / А. Мусаев, Г. Сопыев // Символ науки: международный научный журнал. 2024. Т. 3, № 5-1. С. 152-154.
17. Хазин А.Л. Становление наградной системы России в первой четверти XVIII века // Вестник архивиста. 2007. № 4. С. 113-131.
18. Хитарова Е.Г. Государственный гимн как феномен лингвокультурологии (Российская Федерация и Великобритания) / Е. Г. Хитарова, Д. А. Авакян // Междисциплинарные аспекты лингвистических исследований : Сборник научных трудов / Под редакцией А.В. Зиньковской, В.В. Катерминой, С.Х. Липириди, А.М. Прима, А.В. Самойловой. Краснодар: Кубанский государственный университет, 2022. С. 167-173.

Куприков Никита Михайлович, канд. техн. наук, доцент, nkuprikov@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева,

Доронин Денис Олегович, аспирант, ведущий инженер по стандартизации, Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева,

SOLVING THE ISSUES OF METROLOGICAL SUPPORT FOR THE PRODUCTION OF THE NATIONAL FLAG OF THE RUSSIAN FEDERATION THROUGH THE APPLICATION OF STANDARDIZATION

N.M. Kuprikov, D.O. Doronin

For the purposes of the national interests of the Russian Federation, it is necessary to ensure the unity and accuracy of measurements in the production of the national flag of the Russian Federation and to determine the order of interaction of interested parties involved in trade and economic relations. Insufficient regulation of the industry prevents the full development of this area of economic detail. Standards in the field of production of raw materials and manufacture of products of the state flag of the Russian Federation will provide a unified approach to the regulation of the industry and create a basis for metrological support of production.

Key words: flag, standard, metrology, symbols of the state, Russian Federation, Vexillology.

Kuprikov Nikita Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, nkuprikov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology,

Doronin Denis Olegovich, postgraduate, leading standardization engineer, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-77-78

ЭКОНОМИКО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО СТАНДАРТА «СПЕЦИАЛИСТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ»

Д.Е. Миронов, Ю.В. Будкин, Н.М. Куприков, А.Г. Зайцев, А.А. Горяинов,
В.Г. Красилов, А.А. Стреха, М.Ю. Куприков

ФГБУ «Российский институт стандартизации» ведет свою историю от основанного 18 декабря 1924 года под названием Издательства Народного комиссариата Рабоче-крестьянской инспекции (далее - РКИ), в последствии ставшим в 1934 году Издательством Госстандарта СССР. В 1975 году Издательство стандартов награждено орденом «Знак Почёта». Сегодня славные традиции Издательства стандартов продолжает ФГБУ «Российский институт стандартизации» (ФГБУ «Институт стандартизации») – головной российский институт в сфере стандартизации, подведомственная организация Росстандарта, созданная в результате завершения реорганизации научных институтов системы Росстандарта в соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 марта 2021 года № 519-р. История объединенного института стандартизации берет свое начало в 2005 году, когда в результате завершения первого этапа объединения Всероссийского научно-исследовательского института классификации, терминологии и информации по стандартизации и качеству (ВНИИКИ), созданного в 1964 году, и Издательско-полиграфического комплекса «Издательство стандартов», основанного в 1924 году (в разные годы издательство носило различные названия: с 1927 года — «Техника управления»; с 1931 года — «Рационализация и стандартизация»; с 1934 года — «Государственное издательство стандартов (Стандартгиз)» и, наконец, с 1963 года оно стало называться Издательством стандартов) было создано Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»). Впоследствии в 2018 году (а именно – 19 декабря 2018 года) завершился второй этап формирования объединенного института путем присоединения к ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» институтов системы Росстандарта – ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении» (ФГУП «ВНИИНМАШ», оно начало свою деятельность в 1958 году, а его предшественник – Государственное центральное конструкторское бюро по станкостроению – образовано в 1944 году), ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации оборонной продукции и технологий» (ФГУП «Рособоронстандарт» ведет свою историю с 1968 года, когда был создан Всесоюзный научно-исследовательский институт стандартизации общей техники (ВНИИСОТ)) и ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации материалов и технологий» (ФГУП «ВНИИ СМТ» – продолжатель профессиональных традиций Всесоюзного научно-исследовательского центра по материалам и веществам Госстандарта СССР (ВНИЦ МВ), созданного в 1983 году.). ФГБУ «Российский институт стандартизации» объединяет более 500 специалистов в сфере стандартизации и экспертов, занимающихся разработкой и издательской деятельностью в сфере стандартизации. На базе института ведутся исследования по перспективным направлениям. Накануне 100-летия перед Российским институтом стандартизации ставится задача формирования кадрового потенциала отрасли стандартизации, соответствующего современным вызовам и задачам.

Ключевые слова: стандартная, образование, кадры, профессиональный стандарт.

Во исполнение пункта 16 протокола Коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации от 26 сентября 2018 года № 9 Общероссийским отраслевым объединением работодателей «Союз машиностроителей России» с Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии был проведен мониторинг рынка труда, потребностей в квалификациях, появления новых профессий, изменений в наименованиях и перечнях профессий, в положениях к новым требованиям к профессиям в области стандартизации.

Результаты мониторинга [1-33] показывают, что в среднем более 50% опрошенных организаций не удовлетворены квалификацией специалистов в области стандартизации, сертификации, метрологии, оценки соответствия, управления качеством и технического регулирования. Порядка 80% опрошенных организаций сообщили о готовности принять участие в разработке и совершенствовании профессиональных стандартов в указанных областях профессиональной деятельности.

В мониторинге участвовали следующие отрасли: машиностроение, судостроение, авиакосмическая, оптико-механическая, легкая, химическая промышленность, информационных технологии и информационная безопасность, черная и цветная металлургия, расположенные в 10 субъектах Российской Федерации.

Претензии к уровню квалификации специалистов можно классифицировать следующим образом:

- связанные с деятельностью в области стандартизации – имели 55,5% организаций (не аттестован персонал 22% организаций);
- связанные с деятельностью в области технического регулирования – имели 46,1% организаций (не аттестован персонал 61,9% организаций).

Для большинства профессиональных областей доля организаций, имеющих претензии к уровню квалификации персонала, превышает долю организаций, чей персонал не прошел аттестацию по указанным профессиональным областям. Это свидетельствует о несовершенстве комплексного подхода по аттестации персонала и необходимости совершенствования существующих методик аттестации профессиональных компетенций в области стандартизации, сертификации, метрологии, оценки соответствия, управления качеством.

Результаты данного мониторинга нашли отражение в Плане мероприятий («дорожной карте») развития стандартизации в Российской Федерации на период до 2027 года, утвержденного поручением Правительства Российской Федерации от 15 ноября 2019 г. № ДК-П7-9914.

Профессиональный стандарт «Специалист по стандартизации» разработан во исполнение п. 32 Плана мероприятий («дорожная карта») развития стандартизации в Российской Федерации на период до 2027 года «Проведение по предложениям Минпромторга России и Росстандарта актуализации профессиональных стандартов по востребованным специальностям в области стандартизации».

В 2020 году первая редакция проекта профессионального стандарта разработана федеральным государственным унитарным предприятиям «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Подготовка предложений по совершенствованию деятельности в сфере стандартизации по результатам практики применения Федерального закона «О стандартизации в Российской Федерации» (Шифр «Практика С 10-20») по государственному контракту Министерства промышленности и торговли Российской Федерации № 20401.16Д0190019.10.003 от 03.06.2020.

Целью исследования является изучение практики разработки и использования, распространения и применения профессионального стандарта «Специалист по стандартизации».

Основная часть. Деятельность специалиста по стандартизации относится к сквозным видам профессиональной деятельности и охватывает организационно-методическое, научно-техническое руководство и выполнение разработки, изменения (актуализации), отмены, опубликования и применения документов по стандартизации и иную деятельность, направленную на достижение упорядоченности в отношении продукции (работ, услуг), процессов, систем менеджмента, терминологии, условных обозначений, исследований (испытаний) и измерений (включая отбор образцов) и методов испытаний, маркировки, процедур оценки соответствия объектов стандартизации за исключением федеральных образовательных стандартов и профессиональных стандартов.

Специалисты по стандартизации работают в различных отраслях. Разработка и применение стандартов актуальна как для пищевой, легкой, обрабатывающей и добывающей промышленности, так и для сферы услуг.

В данной сфере работает более 100 тыс. человек, а фонд документов национальной системы стандартизации составляет порядка 36 тысяч документов, без учета документов СТО и ТУ.

Значение для отрасли, анализ существующей ситуации, информация о перспективах развития вида профессиональной деятельности. Разработанный профессиональный стандарт «Специалист по стандартизации» позволит учесть все требования, предъявляемые к сотрудникам служб стандартизации предприятий, организаций, предоставляющих различные услуги и работы, работников организаций, отвечающих за направление стандартизации в центральных подразделениях крупных корпораций, сотрудников организаций, ведущих деятельность по разработке и актуализации служб, осуществляющих деятельность в интересах промышленного сектора экономики.

Область профессиональной деятельности специалистов, соответствующих разработанному профессиональному стандарту, включает:

обеспечение применения на предприятиях и организациях документов по стандартизации, устанавливающих как обязательные, так и добровольные для соблюдения требования к процессам производства, разработки, эксплуатации, утилизации продукции, предоставления услуг и выполнения работ;

применение методов стандартизации в целях повышения эффективности процессов производства, разработки, эксплуатации, утилизации продукции, предоставления услуг и выполнения работ, а также в целях обеспечения продукции и связанных с ней процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации обязательным требованиям безопасности;

разработку и актуализацию документов по стандартизации, обеспечивающих применение методов стандартизации в указанных выше целях;

контроль соответствия конструкторской, проектной, программной и иной технической документации установленным требованиям в документах по стандартизации.

Разработка профессионального стандарта «Специалист по стандартизации» позволяет сформулировать и систематизировать требования, предъявляемые к квалификационным характеристикам работников, выполняющих трудовые функции по нормативно-техническому обеспечению в области изготовления продукции, работ, услуг на стадиях жизненного цикла, нормативно-техническому сопровождению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В дальнейшем перечисленные требования будут использованы работодателями при определении кадровой политики, формированию кадрового резерва, организации аттестации работников, разработке должностных инструкций, тарификации работ, присвоении тарифных разрядов работникам и установлении систем оплаты труда. Также трудовые функции и трудовые действия разработанного профессионального стандарта будут при-

меняться при формировании образовательных программ среднего профессионального образования, высшего образования, дополнительных профессиональных программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации специалистов в области нормативно-техническому обеспечению в области изготовления продукции, работ, предоставления услуг.

Профессиональный стандарт разработан также в целях обеспечения единства требований оценки профессиональной компетентности и квалификации работника.

Вид экономической деятельности, в рамках которой применим профессиональный стандарт «Специалист по стандартизации», приведен в таблице 1.

Основной целью вида экономической деятельности (области профессиональной деятельности) является достижение нормативной и документационной упорядоченности в отношении объектов стандартизации (за исключением федеральных образовательных стандартов и профессиональных стандартов).

Таблица 1

Области Область профессиональной деятельности

Коды ОКВЭД	Вид экономической деятельности
71.12.61	Деятельность в области технического регулирования, стандартизации

Основными сферами применения профессионального стандарта являются:

- широкий круг задач в области управления персоналом (разработка стандартов организаций, систем мотивации и стимулирования персонала, должностных инструкций; тарификация должностей; отбор, подбор и аттестация персонала; планирование карьеры);
- процедуры стандартизации и унификации в рамках вида (видов) экономической деятельности (установление и поддержание единых требований к содержанию и качеству профессиональной деятельности, согласование наименований должностей, упорядочивание видов трудовой деятельности и пр.);
- оценка квалификаций граждан;
- формирование государственных образовательных стандартов и программ профессионального образования и обучения, а также разработка учебно-методических материалов к этим программам.

Профессиональный стандарт «Специалист по стандартизации» может быть использован работодателем для решения следующих задач:

- выбор квалифицированного персонала на рынке труда, отвечающего поставленной функциональной задачи;
- определение критериев оценки при подборе и отборе персонала;
- обеспечение качества труда персонала и соответствия трудовых функций, выполняемых персоналом, установленным требованиям;
- обеспечение профессионального роста персонала;
- поддержание и улучшение стандартов качества в организации через контроль и повышение профессионализма своих работников;
- повышение мотивации персонала к труду в своей организации;
- повышение эффективности, обеспечения стабильности и качества труда, а, следовательно, и высоких экономических результатов.

Профессиональный стандарт «Специалист по стандартизации» является основой для работника в следующих направлениях:

- определение собственного профессионального уровня, направлений и задач профессионального обучения и совершенствования;
- эффективное функционирование на предприятии;
- обеспечение собственной востребованности на рынке труда и сокращение сроков поиска подходящей работы;
- карьерный рост и увеличение доходов.

Профессиональный стандарт «Специалист по стандартизации» необходим для сферы образования при формировании федеральных образовательных стандартов и образовательных программ всех уровней профессионального образования, разработки методических материалов и выбора форм и методов обучения в системе профессионального образования, а также дополнительного профессионального образования персонала на предприятиях и организациях.

Описание обобщенных трудовых функций, входящих в вид профессиональной деятельности. В соответствии с Методическими рекомендациями по разработке профессионального стандарта [29], в рамках вида профессиональной деятельности «Деятельность по стандартизации, включая разработку, опубликование и применение документов по стандартизации (стандартов, норм, правил, регламентов, условий), для обеспечения безопасности объектов стандартизации (процессов, продукции, работ, систем менеджмента, терминологии, условных обозначений, исследований (испытаний) и измерений и методов испытаний, маркировки, процедуры оценки соответствия)» были выделены обобщенные трудовые функции (ОТФ).

Декомпозиция вида профессиональной деятельности на составляющие его ОТФ осуществлялась на основе следующих принципов.

1. Соответствие требованию полноты. Совокупность ОТФ полностью охватывает вид профессиональной деятельности «Выполнение работ и оказание услуг географической направленности». Установленные ОТФ необходимы и достаточны для достижения цели вида профессиональной деятельности.

2. Соответствие требованию точности формулировки. Формулировки ОТФ соответствуют терминологии и положениям законодательной и нормативно-правовой базы, и одинаково понимаются большинством представителей профессионального сообщества.

3. Соответствие требованию относительной автономности трудовой функции. Каждая ОТФ представляет собой относительно автономную (завершенную) часть профессиональной деятельности, ее выполнение возможно

одним работником, и приводит к получению конкретного результата.

4. Соответствие требованию проверяемости. Существует возможность объективной проверки владения работником любой ОТФ.

Объективным основанием для выделения ОТФ является вид работ и сложность их выполнения.

В соответствии приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 12 апреля 2013 г. № 148н и с учетом Отраслевой рамки квалификаций для каждой ОТФ установлены уровни квалификаций. С учетом анализа требований профессиональной деятельности ОТФ отнесены к 5, 6 и 7 уровням квалификации.

Описание обобщенных трудовых функций, входящих в вид профессиональной деятельности, и обоснование их отнесения к конкретным уровням квалификации представлены в таблице 2.

Описание состава трудовых функций. В соответствии с Методическими рекомендациями по разработке профессионального стандарта [29], в каждой ОТФ были выделены отдельные трудовые функции (ТФ).

Описание состава трудовых функций представлено в таблице 3.

Таблице 2

Обобщенные трудовые функции сравнить с функциями СКП ТПП

код	наименование	уровень квалификации	Обоснование уровня квалификации
A	Вспомогательная деятельность по стандартизации в организации	5	Специалист данного уровня квалификации самостоятельно осуществляет анализ документов по стандартизации, относящихся к производству, процессам, продукции, работам и услугам в области деятельности организации; предоставление по запросам работников организации (подразделений организации) документов по стандартизации; формирование и ведение в организации справочно-информационного ресурса (фонда документов), в том числе в электронной форме, для учета и хранения документов по стандартизации. Под руководством более квалифицированного специалиста осуществляет исследование значений показателей качества процессов, продукции, работ, услуг с требованиями документов по стандартизации, в том числе входящих в доказательную базу технических регламентов в областях деятельности организации и анализ применяемых в организации документов по стандартизации для установления соответствия приводимых в них показателей и норм современному уровню развития науки, техники и технологий, требованиям внутреннего рынка, экспортным требованиям.
B	Проведение работ по стандартизации в организации	6	Специалист данного уровня квалификации самостоятельно осуществляет работы по применению методов стандартизации; оценку уровня стандартизации и унификации технической документации; разработку унифицированных технологических процессов; разработку мероприятий по внедрению результатов работ по стандартизации и унификации; разработку документов по стандартизации, необходимых для деятельности организации; методическое сопровождение работ по разработке, актуализации, отмене или внедрению документов по стандартизации в организации
C	Обеспечение и оценка соответствия технической документации организации требованиям документов по стандартизации	6	Специалист данного уровня квалификации самостоятельно осуществляет проверку соответствия технологической документации нормативным документам организации, нормативным правовым актам и документам по стандартизации; проверку состава и комплектности проектов и технической документации при разработке продукции на соответствие документам по стандартизации; контроль соответствия рабочих чертежей, условных обозначений на них документам по стандартизации; ведение учета выявленных несоответствий (ошибок) технической документации; подготовка предложений по устранению выявленных несоответствий (ошибок); формирование отчета и представление руководству сведений о соблюдении в технической документации требований документов по стандартизации
D	Сопровождение деятельности по национальной, межгосударственной, международной стандартизации	6	Специалист данного уровня квалификации самостоятельно осуществляет сбор и анализ предложений по разработке национальных, и межгосударственных документов по стандартизации; разработку проектов национальных, межгосударственных документов по стандартизации; подготовку технических заданий на разработку национальных, межгосударственных документов по стандартизации; подготовку предложений по актуализации и отмене национальных, межгосударственных, международных документов по стандартизации; разработку проектов актуализированных национальных, межгосударственных, международных документов по стандартизации; формирование рабочих групп для разработки, актуализации национальных, межгосударственных документов по стандартизации
E	Организация деятельности по стандартизации	7	Специалист данного уровня квалификации самостоятельно осуществляет определение основных направлений стандартизации в организации; подготовку предложений по разработке и актуализации документов по стандартизации; формирование планов работ по стандартизации, нормализации и унификации, по внедрению новых документов по стандартизации; контроль реализации мероприятий по внедрению документов по стандартизации в организации; контроль разработки новых и пересмотра действующих документов по стандартизации; исследование причин нарушений требований документов по стандартизации применительно к деятельности организации; анализ деятельности структурного подразделения по стандартизации; обеспечение внедрения информационно-аналитических, правовых систем и баз данных для выполнения работ в сфере стандартизации; распределение должностных обязанностей между сотрудниками более низкой квалификации; представительство от имени организации на совещаниях, деловых мероприятиях по вопросам стандартизации
F	Организация и обеспечение деятельности технического комитета по стандартизации	7	Специалист данного уровня квалификации самостоятельно осуществляет подготовку обоснования целесообразности создания технического комитета по стандартизации; определение области деятельности,

код	наименование	уровень квалификации	Обоснование уровня квалификации
			тематики и объема работ технического комитета по стандартизации; обеспечение проведения заседаний технического комитета, ведение протоколов заседаний; контроль за реализацией программы национальной стандартизации по тематике технического комитета по стандартизации и подготовку отчета о ее выполнении; анализ (сопоставление) национального, межгосударственного, международного документа по стандартизации в части его научно-технического уровня отечественному уровню развития промышленности, технологий и инфраструктуры продукции (процессов, работ, услуг); формирование позиции Российской Федерации по проектам национальных, межгосударственных, международных документов по стандартизации в технических комитетах по стандартизации и рабочих группах при них; проверку научно-технического уровня документов по стандартизации; разработку стратегии деятельности технического комитета по стандартизации; организацию проведения техническим комитетом по стандартизации экспертизы документов (проектов документов) по стандартизации; представительство технического комитета в органах государственной власти, организациях и технических комитетах по стандартизации смежных направлений деятельности

Объективным основанием для выделения ТФ выступает вид работы. В состав трудовых функций включены конкретные трудовые действия, выполняемые Специалистом по стандартизации в процессе работы.

Описание состава трудовых функций представлено в таблице 3.

Информация об учете цифровых технологий в профессиональных стандартах представлена в таблице 4.

Таблица 3

Трудовые функции

Трудовые функции		
наименование	код	уровень (подуровень) квалификации
Комплектование фонда документов по стандартизации и обеспечение подразделений организации документами по стандартизации	A/01.5	5
Учет и хранение документов по стандартизации	A/02.5	5
Сбор и обработка информации в целях проведения работ по стандартизации в организации	A/03.5	5
Проведение работ по стандартизации	B/01.6	6
Сопровождение работ по разработке, актуализации, отмене и внедрению документов по стандартизации в организации	B/02.6	6
Нормоконтроль конструкторской документации изделия и технологической документации	C/01.6	6
Нормоконтроль проектной и технической документации	C/02.6	6
Осуществление работ по унификации изделий, их составных частей и информационного обеспечения жизненного цикла изделия	C/03.6	6
Разработка национальных, межгосударственных, международных стандартов и других документов по стандартизации	D/01.6	6
Проведение работ по актуализации и отмене национальных, межгосударственных, международных стандартов и других документов по стандартизации	D/02.6	6
Планирование работ по стандартизации в организации	E/01.7	7
Организация внедрения документов по стандартизации и контроль выполнения требований документов по стандартизации	E/02.7	7
Организация и управление деятельностью подразделения, выполняющего работы по стандартизации	E/03.7	7
Обеспечение деятельности секретариата технического комитета по стандартизации	F/01.7	7
Организация проведения экспертизы проектов документов национальной, межгосударственной, международной стандартизации	F/02.7	7
Управление деятельностью технического комитета по стандартизации	F/03.7	7

Таблица 4

Информация об учете цифровых технологий в профессиональных стандартах

№ п/п	Обобщенная трудовая функция (код и наименование)	Необходимые умения, обеспечивающие \определяющие использование цифровых технологий при выполнении данной функции	Необходимые умения, обеспечивающие \определяющие использование цифровых технологий при выполнении данной функции	Примеры цифровых технологий, используемых в профессиональной деятельности
1	Вспомогательная деятельность по стандартизации в организации	Применять специализированные программные продукты (системы учета, хранения и контроля) для документов по стандартизации	Применять справочно-информационные ресурсы, информационную систему в сфере стандартизации при работе с документами по стандартизации	«Нормдок», «Кодекс», ФГИС «Береста»
2	Проведение работ по стандартизации в организации	Применять системы автоматизированного проектирования, применяемых при разработке конструкторской и технологической документации	-	AutoCAD Bricscad SolidWorks SolidEdge Компас-3D
3	Обеспечение и оценка соответствия технической документации организации требованиям документов по стандартизации	Работать в системах автоматизированного проектирования	-	AutoCAD Bricscad SolidWorks SolidEdge Компас-3D
4	Сопровождение деятельности по национальной, межгосударственной, международной стандартизации	Применять справочно-информационные ресурсы, информационные (автоматизированные) системы в сфере стандартизации		ФГИС «Береста», АИС МГС
5	Организация деятельности по стандартизации	Применять специализированные программные продукты (системы учета, хранения, контроля) для	Применять справочно-информационные ресурсы, информационные (автоматизиро-	«Нормдок», «Кодекс», ФГИС «Береста», Системы электронного

№ п/п	Обобщенная трудовая функция (код и наименование)	Необходимые умения, обеспечивающие \определяющие использование цифровых технологий при выполнении данной функции	Необходимые умения, обеспечивающие \определяющие использование цифровых технологий при выполнении данной функции	Примеры цифровых технологий, используемых в профессиональной деятельности
		документов по стандартизации	ванные) системы в сфере стандартизации	документооборота, Системы 1С-Предприятие
6	Организация и обеспечение деятельности технического комитета по стандартизации	Применять специализированные программные продукты, обеспечивающие разработку национальных, межгосударственных, международных документов по стандартизации	Применять справочно-информационные ресурсы, информационные (автоматизированные) системы в сфере стандартизации	ФГИС «Береста», АИС МГС, «Нормдок», «Кодекс»,

Информация об организациях, на базе которых проводились исследования. В соответствии с Правилами разработки, утверждения и применения профессиональных стандартов, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 22 января 2013 г. № 23, профессиональный стандарт разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» совместно с Фондом развития профессиональных квалификаций Торгово-промышленной палаты Российской Федерации с участием представителей работодателей ключевых отраслей, ведущих образовательных организаций высшего и среднего профессионального образования.

Сведения о нормативно-правовых документах, регулирующих вид профессиональной деятельности, для которого разработан проект профессионального стандарта.

1. Федеральный закон от 29 июня 2015 года № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».
2. Федеральный закон от 27 декабря 2002 года № 184-ФЗ «О техническом регулировании».
3. Договор о Евразийском экономическом союзе от 29 мая 2014 г.
4. Приказ Минпромторга России от 06.07.2017 г. № 2171 «Порядок проведения экспертизы проектов стандартов организаций, а также технических условий, представляемых разработчиком в соответствующие технические комитеты по стандартизации или проектные технические комитеты по стандартизации».
5. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 05.05.2016 № 547 «Об утверждении порядка проведения экспертизы проектов документов, разрабатываемых и применяемых в национальной системе стандартизации».
6. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23.05.2016 г. № 588 «Порядок создания, деятельности и ликвидации технических комитетов по стандартизации, проектных технических комитетов по стандартизации».
7. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 05.05.2016 г. № 545 «Порядок участия технических комитетов по стандартизации в разработке международных, региональных, межгосударственных стандартов».
8. ГОСТ Р 1.1-2020 «Стандартизация в Российской Федерации. Технические комитеты по стандартизации и проектные технические комитеты по стандартизации. Правила создания и деятельности».
9. ГОСТ Р 1.2-2020 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления, внесения поправок и отмены».
10. ГОСТ Р 1.3-2018 «Стандартизация в Российской Федерации. Технические условия на продукцию. Общие требования к содержанию, оформлению, обозначению и обновлению».
11. ГОСТ Р 1.4-2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения».
12. ГОСТ Р 1.5-2012 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила построения, изложения, оформления и обозначения» (с Изменением № 1, с поправкой).
13. ГОСТ Р 1.6-2013 «Стандартизация в Российской Федерации. Проекты стандартов. Правила организации и проведения экспертизы» (с Изменением N 1).
14. ГОСТ Р 1.7-2014 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила оформления и обозначения при разработке на основе применения международных стандартов» (с Изменением № 1).
15. ГОСТ Р 1.8-2011 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты межгосударственные. Правила проведения в Российской Федерации работ по разработке, применению, обновлению и прекращению применения» (с Изменениями № 1, 2, с поправкой).
16. ГОСТ Р 1.15-2017 «Стандартизация в Российской Федерации. Службы стандартизации в организациях. Правила создания и функционирования».
17. ГОСТ Р 1.17-2017 «Стандартизация в Российской Федерации. Эксперт по стандартизации. Общие требования».
18. ГОСТ Р 58182-2018 «Требования к экспертам и специалистам. Нормоконтролер технической документации. Общие требования».
19. ГОСТ 23945.0-80 «Унификация изделий. Основные положения» (с Изменением N 1).
20. ПР 50.1.017—2000 «Порядок работы с документацией в рамках ИСО и МЭК в режиме электронного обмена информацией».
21. ПР 50.1.026—2013 «Порядок оформления и предложения национальных стандартов и стандартов организаций для разработки на их основе публикаций ИСО и МЭК».
22. ПР 50.1.028—2015 «Правила подготовки отзывов Российской Федерации по проектам международных стандартов».
23. ПР 1323565.1.001—2017 Порядок подготовки отзывов по проектам документов ИСО и МЭК, разработанных на основе ограниченного консенсуса.
24. Р 1323565.1.001—2017 Система электронного голосования ИСО. Виды, назначение и порядок использования подсистем электронного голосования ИСО.
25. ПР 1323565.1.003—2019 Методика оценки эффективности деятельности технических комитетов по стандартизации.

26. Порядок и сроки рассмотрения жалоб в комиссии по апелляциям (утверждены Приказом Минпромторга России от 17 февраля 2016 г. № 389).

27. ISO/IEC GUIDE 2:2004 Standardization and related activities — General vocabulary (Стандартизация и смежные виды деятельности. Общий словарь).

28. ISO IWA 30-1:2019 Competence of standards professionals — Part 1: In companies (Квалификация профессионалов в области стандартзации в компаниях).

29. ISO IWA 30-2:2019 Competence of standards professionals — Part 2: In standards-related organizations (Квалификация профессионалов в области стандартизации в организациях связанных со стандартизацией).

Требования к экспертам, привлеченным к разработке проекта профессионального стандарта. В целях разработки профессионального стандарта была сформирована рабочая группа экспертов, в состав которой были включены специалисты в области разработки профессиональных стандартов, эксперты, непосредственно реализующие различные трудовые функции нового разработанного вида профессиональной деятельности «Деятельность по стандартизации, включая разработку, опубликование и применение документов по стандартизации (стандартов, норм, правил, регламентов, условий), для обеспечения безопасности объектов стандартизации (процессов, продукции, работ, систем менеджмента, терминологии, условных обозначений, исследований (испытаний) и измерений и методов испытаний, маркировки, процедуры оценки соответствия)».

Эксперты в рабочую группу выбирались исходя из следующих требований:

требования к представителю профессионального сообщества – высшее образование, стаж работы в профессиональной области не менее 10 лет;

высшее образование, желательно наличие ученой степени в области деятельности.

Все эксперты рабочей группы должны знать:

Трудовой кодекс РФ в части, регламентирующей трудовые отношения в области образования, разработку и применение профессиональных стандартов и иных квалификационных характеристик;

методические рекомендации по разработке профессионального стандарта, утвержденные приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 29.04.2013 г. № 170н, а также другие нормативные, правовые и иные акты и документы, регулирующие процесс разработки и утверждения профессиональных стандартов, включая законы, подзаконные акты, локальные нормативные акты;

уровни квалификации в целях разработки проектов профессиональных стандартов, утвержденные приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 12.04.2013 N 148н;

содержание и структуру профессиональной деятельности в рамках предметной области профессионального стандарта, трудовые функции и действия, выполняемые работниками, профессиональные знания и умения, которыми должны они обладать;

зарубежную и отечественную практику разработки профессиональных стандартов и иных инструментов определения квалификационных требований;

методы эффективной командной работы, приемы эффективных коммуникаций.

Все эксперты рабочей группы должны уметь:

собирать, агрегировать и декомпозировать исходные сведения;

анализировать информацию, включая функциональный анализ сферы профессиональной деятельности;

формулировать дефиниции, классификации и атрибуты в целях разработки профессионального стандарта;

взаимодействовать с другими экспертами, работать в команде.

Все эксперты рабочей группы должны обладать навыками:

оформление документации в соответствии с принятыми (установленными) нормами и правилами;

эффективная коммуникация с использованием современных средств связи/ИКТ;

подготовка и представление презентационных материалов.

Кроме того, при отборе экспертов учитывались требования, не связанные с профессиональными компетенциями, но необходимые для разработки профессиональных стандартов:

независимость;

широкий кругозор;

способность формировать и отстаивать точку зрения.

Этапы разработки профессионального стандарта. В структуре Совета по профессиональным квалификациям в машиностроении с 2018 года создана и действует Комиссия по стандартизации, метрологии и оценке соответствия.

В период 2018-2020 годов по инициативе Росстандарта в Комиссии по стандартизации, метрологии и оценке соответствия Совета по профессиональным квалификациям в машиностроении и Совете по профессиональным квалификациям торговой, внешнеторговой и отдельным видам предпринимательской и экономической деятельности был разработан проект профессионального стандарта «Специалист по стандартизации».

Вопрос разработки профессионального стандарта «Специалист по стандартизации» был неоднократно рассмотрен в рамках деятельности Комиссии по стандартизации, метрологии и оценки соответствия Совета по профессиональным квалификациям в машиностроении.

В октябре 2019 года была организациями-разработчиками принята дорожная карта, в которой были обозначены основные этапы подготовки профессионального стандарта «Специалист по стандартизации» (таблица 5).

Таблица 5

Дорожная карта разработки профессионального стандарта «Специалист по стандартизации»

№	Наименование работы	Срок выполнения работы
1.	Проведение анализа: вида профессиональной деятельности, вида экономической деятельности, группы занятий, к которым относится профессиональный стандарт, тарифно-квалификационных характеристик, содержащихся в Едином тарифно-квалификационном справочнике должностей руководителей, специалистов и служащих, нормативных правовых актов, иных организационно-распорядительных документов, которыми определены требования к квалификации по профессиям, должностям, специальностям, соответствующим данному виду профессиональной деятельности	Октябрь - ноябрь 2019 года

№	Наименование работы	Срок выполнения работы
2.	Направление в Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации уведомления об актуализации профессионального стандарта (по рекомендуемому образцу, предусмотренному приложением № 1 к Рекомендациям по разработке профстандарта, Минтруд, приказ от 29 апреля 2013 г. № 170н)	Ноябрь 2019 года
3.	Организация разработки и согласование проекта профессионального стандарта	Декабрь 2019 года – сентябрь 2020 года
3.1	Разработка наименования вида профессиональной деятельности с учетом Общероссийского классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД) и Общероссийского классификатора занятий (ОКЗ). Соотнесение вида профессиональной деятельности с группами занятий по ОКЗ. Разработка основной цели профессиональной деятельности. Отнесение вида профессиональной деятельности к видам экономической деятельности (по ОКВЭД)	Январь -февраль 2020 года
3.2	Разработка описания обобщённой трудовой функции, трудовых функций (функциональная карта вида профессиональной деятельности)	Март - апрель 2020 года
3.3	Разработка возможных наименований должностей. Формирование требований к образованию и обучению, к опыту практической работы, особых условий допуска к работе	Май 2020 года
3.4	Формирование перечня основных трудовых действий, обеспечивающих выполнение трудовой функции	Июнь 2020 года
3.5	Формирование перечня необходимых умений и знаний, обеспечивающих выполнение трудовой функции	Июль - август 2020 года
4.	Организация обсуждения проекта профессионального стандарта с заинтересованными организациями	Декабрь 2020 года – февраль 2021 года
5.	Сбор, обобщение и анализ замечаний и предложений по проекту профессионального стандарта и внесение в него необходимых изменений	Февраль - март 2021 года
6.	Предоставление в Минтруд комплекта документов, включающих проект профессионального стандарта и пояснительную записку к нему	август 2021 года
7.	Доработка проекта стандарта и комплекта документов с учетом полученных от Минтруда замечаний и предложений	Ноябрь 2021- июнь 2022
8.	Предоставление в Минтруд актуализированного комплекта документов, включающих проект профессионального стандарта и пояснительную записку к нему	июль 2022 года

Разработка профессионального стандарта была проведена в три этапа:

1 этап: анализ квалификационных требований и разработка концепции профессионального стандарта «Специалист по стандартизации».

В ходе данного этапа в январе-феврале 2020 года был определен основных перечень обобщенных трудовых функций с указанием соответствующих требований к уровню квалификации и образования.

2 этап: разработка проекта профессионального стандарта.

В ходе данного этапа в феврале-июле 2020 года были детализированы трудовые функции, требуемые знания и умения к ним.

3 этап: обсуждение проекта профессионального стандарта, сбор отзывов, доработка проекта с учетом поступивших замечаний.

В ходе данного этапа с декабря 2020 года по февраль 2021 года были получены замечания и предложения, а также письма поддержки от 63 организаций включая: Совет по профессиональным квалификациям в машиностроении, Совет по профессиональным квалификациям в нефтегазовом комплексе, Совет по профессиональным квалификациям в ракетной технике, Совет по профессиональным квалификациям в наноиндустрии, Национальный центр развития технологий и базовых элементов робототехники Фонда перспективных исследований, ПАО «ГАЗПРОМ», Государственная корпорация «Росатом», АО «ОСК». АО «Национальный центр вертолетостроения имени М.Л. Миля и Н.И. Камова», ПАО «РКК «Энергия», АО «ЦНИИТОЧМАШ», ФАУ «ЦИАМ», Ассоциация по сертификации «Русский Регистр», ФГУП «ВНИИ «Центр», ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», ФГУП ВНИИОФИ, ФБУ «ЦСМ Татарстан», ФБУ «Новосибирский ЦСМ», ФБУ «Владимирский ЦСМ», ФБУ «Иркутский ЦСМ», ФБУ «Калужский ЦСМ» и другие организации системы Росстандарта (всего 18 организаций системы Росстандарта).

По итогам составлена сводка отзывов и замечаний и предложений, каждое замечание и предложение прошло обсуждение в рамках рабочей группы разработчиков.

Данная сводка была также рассмотрена заочном заседании Комиссии по стандартизации, метрологии и оценке соответствия Совета по профессиональным квалификациям в машиностроении 29.01.2021, по итогам которого разработчикам была поручено учесть данные замечания в проекте профессионального стандарта.

Большинство замечаний, касающихся предложений и замечаний, релевантных формату разрабатываемого документа, учтено в редакции профессионального стандарта.

Были внесены существенные изменения в терминологию профессионального стандарта, а также в структуру ОТФ, ряд из которых был качественно переработан.

Профессионально-общественное обсуждение профессионального стандарта. При проведении общественно-профессионального обсуждения, в соответствии с принятым рабочей группой Положением, заключается в обеспечении контроля качества разработки проекта профессионального стандарта «Специалист по стандартизации» (далее – проекта профессионального стандарта).

Поступили отзывы, заключения, предложения, замечания и письма поддержки от 63 организаций, в том числе:

очные мероприятия – не проводились в связи со сложной эпидемиологической обстановкой;

обсуждение на Интернет-площадках: проведено интерактивное совещание с региональными организациями, приняло участие более 70 специалистов из 25 регионов Российской Федерации (Москва, Санкт-Петербург, Московская область, Самарская область, Республика Удмуртия, Красноярская край, Свердловская область, Тамбовская область, Челябинская область, Владимирская область, Калужская область, Ханты-Мансийский автономный округ, Чувашская Республика, Иркутская область, Рязанская область, Астраханская область, Волгоградская область, Воронежская область, Калининградская область, Республика Крым, Новосибирская область, Ростовская область, Республика Татарстан, Архангельская область, Севастополь).

заочные мероприятия: более 100 адресов рассылки, получено 457 предложений и замечаний (70% которых дублировались, либо имели схожий характер).

ФГБУ «Институт стандартизации» совместно с Фондом развития профессиональных квалификаций Торгово-промышленной палаты Российской Федерации и в соответствии с требованиями, содержащимися в постанов-

лении Правительства Российской Федерации от 22 января 2013 г. № 23 «О правилах разработки, утверждения и применения профессиональных стандартов» и приказах Минтруда России от 12 апреля 2013 г. № 147н «Об утверждении Макета профессионального стандарта» и № 148н «Об утверждении уровней квалификации в целях разработки проектов профессиональных стандартов», провели доработку профессионального стандарта «Специалист по стандартизации». Профессиональный стандарт 40.248 «Специалист по стандартизации» утвержден Приказом Минтруда России от 27.04.2023 № 346н и введен в действие в Российской Федерации.

Заключение. Разработка профессионального стандарта «Специалист по стандартизации» является залогом формирования кадрового потенциала отрасли стандартизации и ведущего НИИ ФГБУ «Российский институт стандартизации».

Выводы:

1. Рассмотренные в исследование стандарты в области стандартизации к настоящему моменту фрагментарно используются участниками работ по стандартизации, что ведет к пониженному интересу к их актуализации.
2. В большой части предприятий из различных отраслей, имеющих отношение к стандартизации, специалисты предпочитают пользоваться стандартами из наличия, сборниками и иной научной литературой, вместо рассмотренных национальных и основополагающих стандартов.
3. Необходимо предпринять меры по повсеместному применению профессионального стандарта «Специалист по стандартизации» в Российской Федерации, позволяющему более эффективно использовать существующие механизмы для развития национальной стандартизации.

Список литературы

1. Агупов В.А. Стандартизация процессов метрологического обеспечения оборонной продукции // Стандарты и качество. 2019. № 4. С. 58-61. EDN JSJOPH.

2. Белобрагин В.Я. Через стандарт - к прогрессу. Обучение, просвещение, наука / В. Я. Белобрагин, Ю. В. Будкин, А. С. Бурый // Стандарты и качество. 2022. № 3. С. 64-68. EDN MUHMZQ.

3. Будкин Ю.В. Каким должен быть эксперт по стандартизации? // Стандарты и качество. 2022. № 9. С. 10-14. DOI 10.35400/0038-9692-2022-9-157-22. EDN YGZNQV.

4. Будкин Ю.В. Межгосударственная стандартизация в реализации политики импортозамещения // Стандарты и качество. 2023. № 2. С. 42-44. EDN BCCRNU.

5. Будкин Ю.В. О реализации изменений в закон "О стандартизации в Российской Федерации" // Стандарты и качество. 2022. № 3. С. 48-49. EDN HJZSWW.

6. Будкин Ю.В. Роль стандартизации в реализации политики импортозамещения // Стандарты и качество. 2022. № 10. С. 46-48. EDN NEQNPE.

7. Будкин Ю.В. Технические спецификации и технические отчеты. Новые категории документов по стандартизации // Стандарты и качество. 2022. № 1. С. 10-13. DOI 10.35400/0038-9692-2022-1-255-21. EDN ATRSIE.

8. Кадровое обеспечение в области стандартизации, сертификации и оценки соответствия / В. Н. Воронин, Н.М. Куприков, М.А. Полищук, А.И. Екимов // Контроль качества продукции. 2019. № 10. С. 9-13. EDN KBAMHT.

9. Куприков Н.М. Геометрографический вектор в матрице компетенций инженера / Н. М. Куприков, М. Ю. Куприков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 147-151. DOI 10.24412/2071-6168-2022-7-147-151. EDN VCMDZQ.

10. Куприков Н.М. Стандартизация как основа повышения конкурентоспособности экономических агентов / Н. М. Куприков, М. Ю. Куприков // Компетентность. 2021. № 8. С. 13-19. DOI 10.24412/1993-8780-2021-8-13-19. EDN RFJIXU.

11. Куприков М.Ю. Диалектика конструкторской документации, или чертеж как язык инженера / М. Ю. Куприков, Н. М. Куприков // Компетентность. 2019. № 6. С. 21-27. EDN AOPWVW.

12. Окрепилов М.В. ВНИИМ и образовательная деятельность (к 175-летию ВНИИМ им. Д.И. Менделеева) / М. В. Окрепилов, Б. Я. Литвинов, Е. Б. Гинак, Н. В. Минина // Законодательная и прикладная метрология. 2017. № 5(150). С. 48-52. EDN ZSHEEL.

13. Окрепилов М.В. ВНИИМ: подготовка специалистов-метрологов в сфере высшего образования / М. В. Окрепилов, Б. Я. Литвинов // Компетентность. 2019. № 5. С. 12-17. EDN CWCWQI.

14. Окрепилов М.В. Формирование компетенций современного специалиста-метролога / М. В. Окрепилов, Б. Я. Литвинов, А. В. Мосичкина // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 2(170). С. 49-53. EDN XNODUK.

15. Окрепилов М.В. ВНИИМ: подготовка специалистов-метрологов в сфере высшего образования / М. В. Окрепилов, Б. Я. Литвинов // Компетентность. 2019. № 5. С. 12-17. EDN CWCWQI.

16. О повышении кадровой конкурентоспособности предприятий / В. Н. Воронин, Н. М. Куприков, А. И. Екимов, В. И. Пономарев // Компетентность. 2019. № 8. С. 4-9. EDN SCSNPS.

17. Литвинов Б.Я. Методические вопросы подготовки специалистов в области метрологии, стандартизации и управления качеством после утверждения нового перечня специальностей и направлений подготовки высшего образования / Б. Я. Литвинов, Н. Н. Скориантов, Р. Н. Целмс // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей V Международного форума / Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. С. 169-170. EDN NEMVTU.

18. Стандартизация в Российской Федерации: учебное пособие / Б. В. Бойцов, М. Л. Рахманов, А. Г. Савельев [и др.]. Орёл: Издательство «Картуш», 2023. 128 с. EDN GUQKYK.

19. Метрологическое образование в России: итоги и перспективы / А.Н. Пронин, Б.Я. Литвинов, М.В. Окрепилов, В.А. Слаев // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16, № 3. С. 63-69. DOI 10.20915/2687-0886-2020-16-3-63-69. EDN LJRRJJ.

20. Мантуров Д.В. Национальная стандартизация для развития экономики // Стандарты и качество. 2019. № 4. С. 88. EDN PQDWWL.

21. Мосичкина А.В. Профессиональные стандарты в области метрологии. Модель построения отраслевой рамки квалификаций / А. В. Мосичкина, М. В. Окрепилов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Сборник статей V Международного форума / Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. С. 171-172. EDN AEYRQK.

22. Мосичкина А.В. Развитие Национальной системы квалификаций // Главный метролог. 2020. № 5(116). С. 67-69. EDN NBQHXZ.

23. Мосичкина А.В. Применение профессиональных стандартов при формировании компетенций современного специалиста-метролога / А. В. Мосичкина, М. В. Окрепилов // Эталоны. Стандартные образцы. 2021. Т. 17, № 2. С. 73-81. DOI 10.20915/2687-0886-2021-17-2-73-81. EDN LASZXY.

24. Мосичкина А.В. Вопросы разработки и применения профессиональных стандартов в области метрологии / А. В. Мосичкина, Б. Я. Литвинов, М. В. Окрепилов // Законодательная и прикладная метрология. 2022. № 3(177). С. 42-46. EDN PRUBIL.

25. Мосичкина А.В. Компетентность метрологических подразделений и оценка квалификации персонала / А. В. Мосичкина, Б. Я. Литвинов, М. В. Окрепилов // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2022): Материалы Восьмой всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург: "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2022. С. 8-10. EDN EUDQGT.

26. Мосичкина А.В. Актуализация профессионального стандарта 40.012 «Специалист по метрологии» / А. В. Мосичкина, М. В. Окрепилов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Материалы III Международного форума в рамках празднования 80-летия Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 300-летия Российской академии наук / Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 211-212. EDN JINWKT.

27. Литвинов Б.Я. Трудовые функции метрологов в условиях цифровой трансформации / Б. Я. Литвинов, А. В. Мосичкина // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: IV Международный форум: сборник статей / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. С. 137-138. EDN AXYZGV.

28. Литвинов Б.Я. Профессиональные стандарты в области метрологии / Б. Я. Литвинов, А. В. Мосичкина // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Материалы III Международного форума в рамках празднования 80-летия Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 300-летия Российской академии наук / Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 202-203. EDN DZESIZ.

29. Методические рекомендации по разработке профессионального стандарта, утв. Приказом Минтруда России от 29 апреля 2013 г № 170н.

30. Литвинов Б.Я. Подготовка метрологов и оценка квалификаций / Б. Я. Литвинов, М. В. Окрепилов // Управление качеством в образовании и промышленности : Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции / Редколлегия: Белая М.Н. (отв. ред.). Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2020. С. 788-793. EDN GZZZIN.

31. Применение профессиональных стандартов при формировании компетенций современного специалиста-метролога / Л.А. Конопелько, М. В. Окрепилов, А. В. Мосичкина, О. И. Палий // Альманах современной метрологии. 2023. № 1(33). С. 256-264. EDN SKQZYT.

32. Пронин А.Н. Стандарты и долгосрочные цели организации / А. Н. Пронин, М. В. Окрепилов, Б. Я. Литвинов // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Международный форум: тезисы. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 100-101. EDN YZVCQX.

33. Пронин А.Н. Государственный научный метрологический центр: проблемы кадрового обеспечения / А. Н. Пронин, М. В. Окрепилов, Б. Я. Литвинов // Компетентность. 2018. № 8(159). С. 39-45. EDN YQHJYD.

Миронов Денис Евгеньевич. генеральный директор, Россия, Москва, Институт стандартизации,

Будкин Юрий Валерьевич, д-р техн. наук, доцент, советник генерального директора, Россия, Москва, Институт стандартизации,

Зайцев Алексей Геннадьевич, д-р экон. наук, доцент, научный сотрудник, Россия, Москва, Институт стандартизации,

Горяинов Андрей Андреевич, специалист отдела кадров, Россия, Москва, Институт стандартизации,

Красилов Вячеслав Германович, заместитель начальника отдела нефтегазового, теплогенерирующего оборудования и станкостроения, Россия, Москва, Институт стандартизации,

Куприков Никита Михайлович, канд. техн. наук, доцент, nkuprikov@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева,

Куприков Михаил Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Стреха Анатолий Александрович, канд. экон. наук, начальник отдела стандартизации в области социальной сферы, Россия, Москва, Институт стандартизации

ECONOMIC AND MANAGERIAL PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF THE PROFESSIONAL STANDARD "STANDARDIZATION SPECIALIST"

D.E. Mironov, Yu.V. Budkin, A.G. Zaitsev, A.A. Goryainov, V.G. Krasilov, N.M. Kuprikov, M.Yu. Kuprikov, A.A. Strekha

The Federal State Budgetary Institution "Russian Institute of Standardization" traces its history back to the Publishing House of the People's Commissariat of Workers' and Peasants' Inspection, founded on December 18, 1924, under the name of the Publishing House of the People's Commissariat of Workers' and Peasants' Inspection (hereinafter - RKI), which later became the Publishing House of the USSR State Standard in 1934. In 1975, the Publishing House of Standards was awarded the Order of the Badge of Honor. Today, the glorious traditions of the Publishing House of standards are continued by the Federal State Budgetary Institution "Russian Institute of Standardization" (FSBI "RIS") – the main Russian institute in the field of standardization, a subordinate organization of Rosstandart, created as a result of the completion of the reorganization of scientific institutes of the Rosstandart system in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation dated March 2, 2021 No. 519-R. The history of the Joint Institute of Standardization dates back to 2005 when the Federal State Unitary Enterprise "Russian Scientific and Technical Information Center for Standardization, Metrology and Conformity Assessment" (FSUE "STANDARTINFORM") was established, as a result of the completion of the first stage of the unification of the All-Russian Scientific Research Institute of Classification, Terminology and Information on Standardization and Quality (VNIIKI), established in 1964 and the Publishing and printing complex "Publishing House of Standards", founded in 1924 (in different years, the publishing house was named since 1927 — "Management Technique", since 1931 — "Rationalization and Standardization", and finally since 1934 — "State Publishing House of Standards (Standartgiz)", and since 1963 it became known as the Publishing House of Standards). Subsequently, in 2018 (December 19, 2018), the second stage of the formation of the joint institute was completed by joining the FSUE "STANDARTINFORM" institutes of the Rosstandart system of FSUE "All-Russian Research Institute for Standardization and Certification in Mechanical Engineering" (FSUE "VNIINMASH" began its activities in 1958, and its predecessor, the State Central Design Bureau in machine tool industry, it was founded in 1944.), The All-Russian Scientific Research Institute for Standardization of Defense Products and Technologies (SUE Rosoboronstandart traces its history back to 1968, when the All-Union Scientific Research Institute for Standardization of General Equipment (VNIISOT) was established) and the All-Russian Scientific Research Institute for Standardization of Materials and Technologies (FSUE VNII SMT – the successor of professional traditions of the All-Union Scientific Research Center for Materials and Substances of the USSR State Standard (VNITS MV), established in 1983.). The Federal State Budgetary Institution "Russian Institute of Standardization" unites more than 500 specialists in the field of standardization and experts involved in the development and publishing activities in the field of standardization. The Institute conducts research in promising areas. On the eve of the 100th anniversary of the Russian Institute of Standardization, it sets the task of forming the human resources potential of the standardization industry that meets modern challenges and tasks.

Key words: standard, education, personnel, professional standard.

Mironov Denis Evgenievich. director general, Russia, Moscow, Institute of Standardization,

Budkin Yuri Valeryevich, doctor of technical sciences, docent, advisor to the general director, Russia, Moscow, Institute of Standardization,

Zaitsev Alexey Gennadievich, doctor of economics, docent, researcher, Russia, Moscow, Institute of Standardization,

Goryainov Andrey Andreevich, HR Specialist, Moscow, Russia, Institute of Standardization,

Krasilov Vyacheslav Germanovich, deputy head of the department of oil and gas, heat generating equipment and machine tools, Russia, Moscow, Institute of Standardization,

Kuprikov Nikita Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, nkuprikov@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, D.I. Mendeleev All-Russian Scientific Research Institute of Metrology,

Kuprikov Mikhail Yurievich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Strekha Anatoly Alexandrovich, candidate of economic sciences, head of the department of standardization in the field of social sphere, Russia, Moscow, Institute of Standardization

УДК 658.274
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-88-89

ПРИМЕРЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СОВРЕМЕННЫХ ШВЕЙНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

А.Р. Совина

В данной статье рассматриваются вопросы автоматизации технологических процессов отечественных современных швейных производств. Автором описывается каждый этап разработки изделия, исходя из структуры швейного производства. Приведен обзор автоматизированного оборудования с примерами на отечественных предприятиях. Определены преимущества внедрения и использования автоматизированных комплексов на производстве.

Ключевые слова: автоматизация, швейное производство, швейная фабрика, оборудование.

Российская легкая промышленность насчитывает более 22 тыс. предприятий и более 2 тыс. отечественных брендов. Уход порядка 40% европейских брендов в 2022 году не остановил спрос россиян на качественную продукцию, наоборот, в стране выросла потребность в создании новых швейных производств. Окно возможностей, которое открылось сейчас особенно у швейной индустрии, должно восполняться отечественными компаниями благодаря созданию небольших производств по всей стране, отвечающим технологическим тенденциям сегодняшнего дня.

К ключевым задачам современного предприятия относят повышение эффективности и рентабельности производства. В условиях цифровой трансформации основным инструментом для достижения данных целей является автоматизация производства. Предприятия легкой промышленности современного типа – не исключение. Процессы производства швейных изделий, как и любые бизнес-процессы, подлежат модернизации с целью ускорения цикла производства товара и снижения затрат по себестоимости [1].

Легкая промышленность развивается стремительными темпами, постоянно совершенствуя технологические процессы, что приводит к переналаживанию и перепрограммированию их автоматической системы управления. Все сферы швейной промышленности используют целый комплекс сложных технологических процессов для создания конечного продукта, что делает автоматизацию производственного процесса многообразной и функционально сложной [2].

Исходя из структуры швейного производства, приведем некоторые примеры автоматизации производственных процессов на швейном предприятии.

Экспериментальный цех – первый этап в разработке изделия на швейном производстве, в котором работают над созданием модели, разработкой конструкции, техническим размножением лекал, нормированием расхода материала и разработкой технической документации. Как правило, сотрудники цеха сами разрабатывают модели. Однако и на этом этапе прибегают к системам автоматизированного проектирования: графические планшеты, дигитайзеры, планшетные режущие плоттеры, раскройные комплексы.

Считается, экспериментальный цех является самым неавтоматизированным этапом на производстве, задача которого отшить эталонный образец изделия. На некоторых производствах именно так это и есть: используют раскройные и швейные столы.

Однако также могут применяться в работе специализированные раскройные установки для раскроя однослойных полотен ткани с механической системой реза, которые могут иметь функции, представленные в таблице.

Дополнительные функции раскройной установки

Производители / Функция	Lectra Systems	Investronica Sistemas	Gerber Technology	Shima Seiki
Адаптация раскладки лекал к рисунку ткани	+	+	+	
Стандарт plug&play («включил и работай»)			+	
Модульная раскройная система для раскладки и резания кожи с автораспознаванием бракованных участков с помощью системы автоматического сканирования контура куска			+	
Большая эффективная площадь реза				+
Бесшумная работа				+
Нанесение информации на картон	+			
Опции для вырезания вытачек, нанесения надсечек и сверления отверстий	+			

Подобные раскройные комплексы позволяют быстро раскроить детали по требованию, существенно снизить цикл разработки коллекции и стоимость изделия, что, как отмечалось выше, является принципиальными задачами любого швейного предприятия. Также информация, полученная при раскрое единичного настила, может быть сохранена, проанализирована службой сервиса и передана из экспериментального цеха в массовое производство, в том числе через Интернет-соединение. Простые в обслуживании комплексы, такие как производства Gerber Technology (Рис. 1), дают возможность пользователю производить образцы или малые партии при минимальном вмешательстве в бизнес-поток.

Подготовительный цех отвечает за промер поступивших материалов, подготовку материала, хранение подготовленных к раскрою материалов, расчет расхода материала, подготовку верхнего полотна настила и является следующим этапом в разработке изделий. Включает распаковочное, разбраковочно-примерочное отделения, а также отделения хранения, расчета и комплектования кусков материала.

Основные задачи решают с помощью разбраковочных и мерильно-разбраковочных машин (рис. 2), которые выполняют функции проверки состояния, измерения длины, перемотки и подготовки к дальнейшим технологическим операциям тканых эластичных и неэластичных материалов в рулонах. Также на данном этапе важными помощниками в решении задач являются:

– системы автоматизированной оценки и учета расхода материала;
– системы промежуточного складирования и учета;
– подготовительные системы к раскрою для определения типа настилания и раскроя [2].



Рис. 1. Конвейерный однослойный раскройный комплекс производства Gerber Technology



Рис. 2. Мерильно-разбраковочная машина производства Rexel

Раскройный цех, сотрудники которого осуществляют настилание материалов, раскрой настила, проверку качества кроя и пришивание поточных талонов, – третий этап разработки изделия. Подвижные или стационарные раскройные машины производят настилание тканей и последующий раскрой.



Рис. 3. Серия многослойных раскройных комплексов Orox iCUT

Для работы в раскройном цехе используются специализированные настилочные комплексы, раскройные комплексы с разного рода способами раскроя, системы маркировки деталей (штрихкоды, QR-коды).

Так, на ивановской швейной фабрике Исток-ПРОМ в автоматизированном раскройном цехе, открывшемся в марте 2024 года, работает комплекс Orox iCUT (рис. 3). Данная серия многослойных раскройных комплексов с ленточным конвейером предназначена для раскроя материалов с высотой настила в 25/60/80/100 мм после сжатия вакуумом. Вакуумная турбина сжимает слои материала, а режущая головка с ножом с системой контроля, обеспечивающей стабильность работы ножа, позволяет обеспечить высокую точность кроя и качество прорезаемых срезов деталей, что является одним из главных преимуществ, которое позволяет снизить процент брака. Управление комплексом может производится с платформы оператора или непосредственно из пульта управления на рабочей балке.

По словам руководителей ООО «Исток-ПРОМ», автоматизированный раскройный цех позволяет сократить цикл операции от 5 до 8 дней.

Одним из способов эффективной оптимизации раскройных участков являются лазерные станки Photonim (рис. 4). Станки позволяют существенно увеличить скорость и точность кроя, обеспечить возможность быстрой подготовки компьютерных лекал к раскрою, простоту их редактирования и архивирования, тем самым освобождая помещения для хранения коллекций выкроек, и сократить число специалистов раскроя до одного оператора станка [3].

Лазерные раскройщики Photonim пользуются спросом у многих российских швейных предприятий, например, московских ZASPORT и Ветер Спорт, уфимской Three Fives, специализирующихся на пошиве спортивной формы и экипировки, а также тульской Зеленснаб, которая занимается производством товаров для растениеводства.

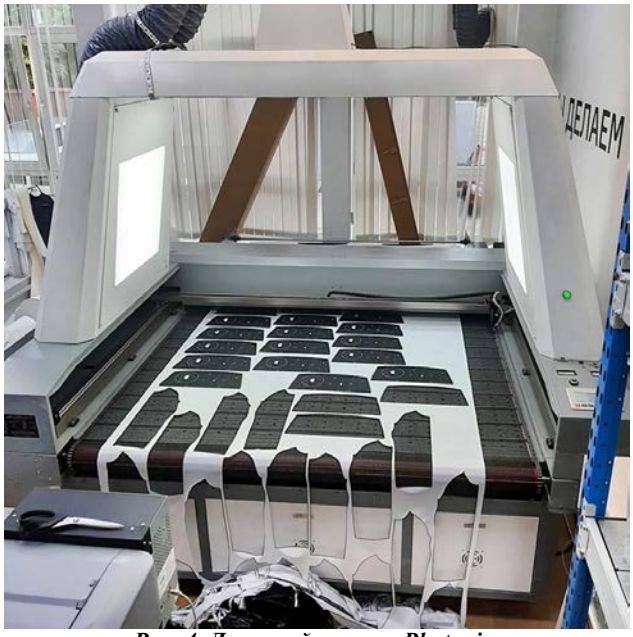


Рис. 4. Лазерный станок Photonim



Рис. 5. Автоматическая линия по пошиву постельного белья производства TEXPA

Особо значимый этап в производстве – швейный. В швейном цехе определяется ряд основных задач: проверка качества кроя, подготовка деталей по рисунку, разметка на деталях мест расположения карманов, складок, петель, вытачек и пр., пошив изделий. Обычно находится несколько технологических потоков для запуска разных моделей изделий. Заготовительный участок отвечает за обработку отдельных деталей и узлов изделий, а монтажный – за соединение готовых деталей и узлов в единое изделие.

Швейная фабрика ООО «Комфорт» Тейковского ХБК в своем технологическом арсенале имеет автоматические линии по пошиву пододеяльников, наволочек и простыней TEXPA (Германия) (рис. 5-6). При условиях работы 24/7 он позволяет получить производительность около 2-3 пододеяльников в минуту.

Также в швейном цехе могут базироваться следующие установки:

1) установка поперечной обшивки для махровой ткани;
2) установка продольной обшивки постельного белья;
3) установка продольной обшивки постельного белья;
4) установка продольной обшивки гардин.



Рис. 6. Автоматическая линия по пошиву постельного белья производства TEXPA

Опциональным этапом швейного производства является декорирование. Нередко, когда в ассортименте производимой продукции появляются изделия с вышивкой. Процесс вышивки можно также производить автоматически в вышивальной-дизайн студии. Подобное оборудование уже используется на Исток-ПРОМ: высокоскоростная автоматизированная пятнадцатиигольчатая машина фирмы Barudan (рис. 7), предназначенная для вышивки на готовых изделиях и элементах кроя, полотнах и головных уборах, позволяет одновременно делать вышивку на шести станках.



Рис. 7. Шестиголовочная вышивальная машина производства Barudan

В цехе влажно-тепловой обработки изделие приобретает товарный вид для последующей упаковки. Производители дополняют автоматизированные линии дублирующими прессами, парогенераторами и т.п. Данные устройства могут использоваться не только для разглаживания заломов на ткани, но также для создания плиссировки, проклеивания воротников и манжетов, включая операции с воздействием пара высокой температуры [4].

Процесс упаковки изделия существует как ручной с установкой специальных столов, так и автоматический с помощью дополнительного оборудования, которое само будет упаковывать готовую продукцию. Например, существуют такие установки:

1) автоматический контроль, складывание и упаковка;
2) установка складывания для плоских простыней и пододеяльников.

Однако Тейковский ХБК, несмотря на свою технологичность, использует ручную упаковку товара: по их опыту работы товар будет упакован аккуратнее.

Склад готовой продукции является последним этапом структуры швейного предприятия, в котором принимают одежду, сортируют по моделям, а затем отправляют в торговые сети или распределяют по заказам, в том числе забронированным на маркетплейсах.

Если на неавтоматизированном складе изделия хранятся на кронштейнах или стеллажах, то на автоматизированном – либо на автоматических передвижных блоках, либо на стеллажах в зависимости от модели, цвета и т.д. с использованием цветовой и символьной маркировки. Такая маркировка удобна как сотрудникам склада, так и роботам-кладовщикам, например, отечественному роботу КиберСклад (рис. 8-9).

Робот оснащен системой компьютерного зрения и датчиками обнаружения помех, что позволяет ему принимать решение об объезде или ожидании. Для ориентации в помещении робот строит 3D-карту. По правилам для подготовки робота к использованию требуется провести оцифровку территории склада, если на складе уже есть специальные маршруты для складского транспорта, автономная система управления роботом будет на них ориентироваться. Примером внедрения робота служит швейная фабрика «Исток-ПРОМ», транспортировке в которой подлежат рулоны ткани, раскроя и заготовок.



Рис. 8. Складской робот КиберСклад

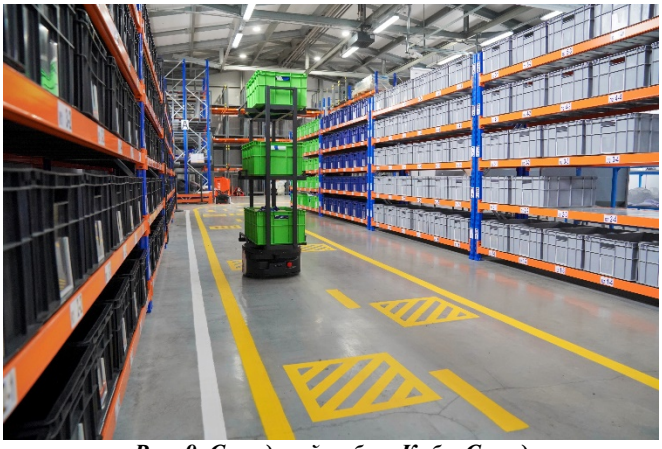


Рис. 9. Складской робот КиберСклад

Таким образом, основными преимуществами автоматизированных комплексов на швейном производстве являются:

1) снижение процента брака;
2) гарантия правильности выкроек и их эстетичный внешний вид;
3) низкий расход материалов;
4) вариативность применения установок;
5) минимальное вмешательство оператора оборудования;
6) низкий уровень шума.

Можно сделать вывод, что отечественные швейные предприятия уже обращают внимание на возможность автоматизации производственных линий, путем использования современного высокотехнологичного оборудования и программного обеспечения. Исходя из определения автоматизации, процесса замены физического труда человека, затрачиваемого на управление механизмами [2], и опыта внедрения автоматизированный комплексов на предприятиях, в результате автоматизации сокращается ручной труд, и, соответственно, увеличивается скорость и качество пошива, происходит процесс стандартизации изделий и оптимизации работы. Однако некоторые процессы, как например, процесс упаковывания изделий, руководители швейных производств не решаются заменить на автоматические в связи с желанием сохранить качество.

Список литературы

1. Кузнецов А.А., Ринейский К.Н., Клименкова С.А., Чернов Е.А. Основы автоматизации швейного производства : учебное пособие / под ред. Е.Н. Самусевич. Минск: РИПО, 2021. 175 с.
2. Килимова А.Д., Труевцева М.А. Оптимизация процессов производства швейных изделий (цифровизация в легкой промышленности) // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2019. № 3. С. 37 – 43.

3. Легпром.ревю. Лазерные станки Photonim — способ эффективной оптимизации раскройных участков. [Электронный ресурс] URL: https://legprom.review/azernye-stanki-photonim-sposob-effektivnoy-optimizatsii-raskroynyh-uchastkov/ (дата обращения: 01.10.2024).
4. Швейное оборудование «ТМТ-Сибирь». [Электронный ресурс] URL: https://tmtsib.ru/blog/2021/07/18/avtomatizirovannye-linii (дата: обращения: 02.10.2024).

Совина Анна Рудольфовна, ассистент, rudolfovna15@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

EXAMPLES OF AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN MODERN SEWING INDUSTRIES

A.R. Sovina

This article discusses the issues of automation of technological processes of domestic modern sewing industries. The author describes each stage of product development based on the structure of sewing production. An overview of automated equipment with examples at domestic enterprises is given. The advantages of the introduction and use of automated complexes in production are determined.
Key words: automation, sewing production, sewing factory, equipment.

Sovina Anna Rudolfovna, assistant, rudolfovna15@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation

УДК 669.1
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-93-94

МЕТОД ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

Г.Г. Бурый, Р.Ф. Салихов, И.К. Потеряев

В работе описывается метод входного контроля позволяющий проверить качество деталей автомобилей. Исследование проведено на примере детали «рейка гидронатяжителя» двигателя автомобиля марки Хюндай Солярис. Приведенный метод исследования позволил выявить низкое качество исследуемой детали-аналога, что приводит к аварийному отказу элементов различных механизмов и систем двигателя . Для проверки качества материала применялись такие методы как: оптико-эмиссионный спектральный анализ, измерение твердости, металлографический анализ.
Ключевые слова: качество детали, химический состав, твердость, микроструктура,

На сегодняшний день существует большое количество производителей деталей автомобилей. Узлы, детали одного наименования имеют большой разброс по стоимости на рынке. Это связано в числе прочих причин с низким качеством производства деталей. Визуально качество детали сложно оценить. При монтаже некачественной детали происходит не только ее преждевременный отказ, но и сопрягаемых с ней дорогостоящих деталей и узлов. Так, например, из-за отказа рейки гидронатяжителя газораспределительного механизма происходит катастрофический износ всего механизма, а также цилиндро-поршневой группы, получает изгиб или разрушение коленчатый вал. Большинство проблем связанных с производством некачественных деталей связаны с нарушением технологии ее изготовления, несоответствия установленным геометрическим параметрам, в том числе недостаточная прочность. Перечислим причины производства некачественных деталей. Некоторые производители придают заготовке форму детали, а далее не проводят термическую обработку или изготавливают из более дешевого материала, что значительно снижает стоимость производства. Производители это делают из-за отсутствия термического оборудования, что говорит о недостаточной оснащённости производства. Также возможны ошибки в технологии производства из-за некомпетентности сотрудников. Плохое качество исходных материалов, также может стать причиной выпуска некачественных деталей.

Таким образом, при закупке деталей для проведения ремонта, организация должна проводить входной контроль. В противном случае собранное изделие будет преждевременно отказывать, и организация понесёт значительные убытки.

Рассмотрим пример оригинальной и некачественной детали-аналога двигателя автомобиля «Хюндай Солярис», а именно рейку натяжителя цепи ГРМ, которая отказала после нескольких месяцев эксплуатации. На рис. 1а представлена некачественная деталь-аналог, а на рис. 1 б приведена качественная оригинальная деталь. Как видно из рис. 1а зубья рейки смяты, что говорит о недостаточной твёрдости детали, что и привело к аварийному отказу двигателя.

Но и здесь могут быть сомнения в низком качестве детали, так как производитель детали может обвинить эксплуатанта в ненадлежащей эксплуатации автомобиля. Поэтому требуется более детальный анализ.

Методика входного контроля включает в себя множество процедур. Одной из таких процедур является химический анализ детали с помощью специальных устройств - спектрометров. Однако химический состав не меняется после проведения термической обработки и применение данных устройств не поможет понять проводилась ли термическая обработка. Тем не менее, в некоторых случаях, по химическому составу тоже можно понять возможность или невозможность получения заданной величины твердости поверхности детали после термической обработки.

Спектральный анализ показал, что ограничительная рейка натяжителя цепи газораспределительного механизма выполнена из стали 18кп, данная сталь содержит недостаточное количество углерода для закалки и дальнейшего отпуска, для углеродистых сталей минимальное содержание углерода для закалки и отпуска составляет приблизительно 0,2% [2-5].



а ***б***

Рис. 1. Рейки натяжителя цепи ГРМ: а – некачественная деталь; б – качественная деталь

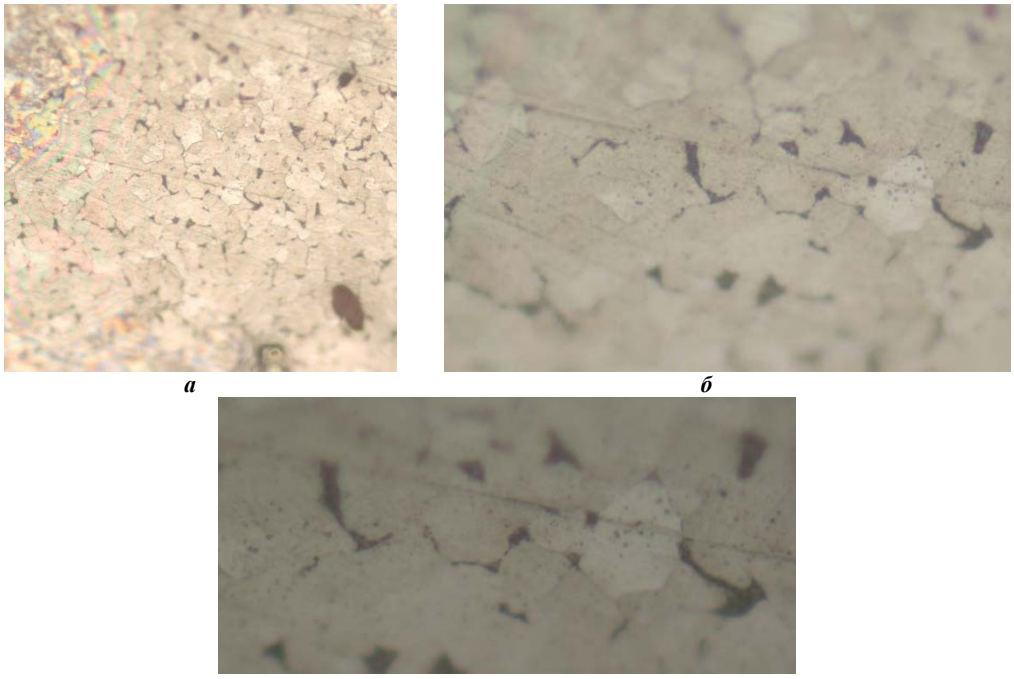
Более простым, менее трудоемким и менее дорогостоящим способом выявления отсутствия заданной прочности является замер её твёрдости. Твёрдость – это способность сопротивляться внедрению другого более твёрдого тела. Существуют различные методы замера твёрдости с определёнными обозначениями. Например, число твёрдости по методу Бринелля указывается перед буквами НВ. В методе Роквелла число твёрдости указывается после букв HRA, HRB, HRC, так как этот метод содержит 3 способа. Способ А применяется для незакалённых сталей. Способ В применяется для сплавов цветных металлов. Способ С применяется для закалённых сталей. Оригинальный натяжитель цепи ГРМ должен иметь твердость около 600НВ или HRC50. На рис. 2. представлен процесс замера твёрдости некачественной детали ультразвуковым твёрдомером ТКМ-459.



Рис. 2. Замер твёрдости некачественной рейки ультразвуковым твёрдомером ТКМ-459

Как видно из рис. 2 значение твёрдости по Бринеллю детали исследуемой детали-аналога составляет всего 168НВ, что соответствует твёрдости заготовки, не подвергавшейся термической обработке. Однако и замер твёрдости не может однозначно свидетельствовать о некачественной термической обработке, так как поверхность детали

может быть упрочнена, а сердцевина остаться без изменений. В этом случае целесообразно применение микроанализа. Микроанализ включает в себя процедуру отрезки куска металла называемого микрошлифом. Далее проводится шлифование и полирование конкретной исследуемой поверхности. Важно правильно подобрать поверхность, которая отразит картину строения сплава. Затем в зависимости от вида сплава на исследуемую поверхность наносится определённый химический реактив. Назначение химического реактива состоит в том, чтобы растворить участки химических соединений, например карбидов, и по форме этих участков определить вид сплава. После обработки реактивом проводится промывка исследуемой поверхности от продуктов травления и последующая сушка. Картина строения позволяет определить не только вид сплава но и приблизительный химический состав. Наличие магнитных свойств свидетельствует о том, что рассматриваемая деталь выполнена из сплава на основе железа. Исследованию лучше подвергать поперечное сечение детали. Шлифование проводится наждачными бумагами с постепенным снижением зернистости. Полирование стоит проводить войлоком и полировальной пастой, а далее фетром с нанесением на него полировальной жидкости состоящей из 5% водного раствора оксида алюминия. На исследуемую поверхность наносится реактив, состоящий из 5% раствора азотной кислоты в этиловом спирте. Если деталь подвержена термической обработке, тогда потребуется другой реактив, содержащий в составе 5% растворы пикриновой азотной и соляной кислоты в этиловом спирте. Далее проводится промывка поверхности этиловым спиртом и сушка. Рассмотрим картину строения сплава рейки, проводилось травление реактивом 5% раствора азотной кислоты в этиловом спирте рис. 3. [2]



а ***б*** ***в***

Рис. 3. Картина строения сплава рейки: а – при увеличении в 200 раз; б – при увеличении в 500 раз; в – при увеличении в 1000 раз

Приведённая на рис. 3. картина строения сплава говорит о том, что сталь не подвергалась термической обработке, так как поверхность протравилась реактивом 5% раствора азотной кислоты в этиловом спирте. Наличие малочисленных участков темного перлита на фоне светлого феррита свидетельствует о содержании углерода менее 0,2%. Этот факт говорит о невозможности проведения для этой стали таких операций как закалка и отпуск [2-5] .

Таким образом, путем проведения комплекса испытаний была выявлена причина выхода из строя рейки натяжителя цепи ГРМ, а именно неподходящий материал, и как следствие, отсутствие необходимой прочности детали цепи ГРМ двигателя.

Список литературы

1. Беккерт М. Справочник по металлографическому травлению / М. Беккерт, Х. Клемм. Москва : Металлургия, 1979. 336 с.

2. Бурый Г.Г. Принцип подбора металлических материалов для деталей автомобилей и тракторов // Справочник. Инженерный журнал. 2018. № 4(253). С. 51-56.

3. Старцева А.В. Исследование микроструктуры роторов двухстепенных поплавковых гироскопов с помощью сканирующего электронного микроскопа / А. В. Старцева, Б. Л. Шарыгин, Е. Г. Литуненко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 2. С. 247-254.

4. Исследование микроструктуры лент Nb–Ti методами электронной микроскопии / А. В. Овчаров, И. А. Каратеев, К. Г. Каратеева [и др.] // Кристаллография. 2019. Т. 64, № 6. С. 862-866.

5. Большаков В.И., Сухомлин Г.Д., Лаухин Д.В. Атлас структур металлов и сплавов. Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2010. 174 с.

Бурый Григорий Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент, buryy1989@bk.ru, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,

Салихов Ринат Фокилевич, канд. техн. наук, доцент, salikhorinat@mail.ru, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,

Потеряев Илья Константинович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, poteryaev_ik@mail.ru, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

PRACTICAL USE OF MICROANALYSIS FOR DIAGNOSTICS OF CAR PARTS

G.G. Buriy, R.F. Salikhov, I.K. Poteryaev

The paper describes the relevance of incoming inspection methods when purchasing car parts. A low-quality car part is considered. Research methods are presented that allow identifying the low quality of the part. The shortcomings of the presented methods are described using the example of the part in question. The most effective method for assessing the quality of a steel part is considered using the example of the part in question.
Key words: alloy, chemical composition, structure, etching.

Buriy Grigoriy Gennadjevich, candidate of technical sciences, docent, buryy1989@bk.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile and Road University,

Salikhov Rinat Fokilevich, candidate of technical sciences, docent, salikhorinat@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile and Road University,

Poteryaev Ilya Konstantinovich, candidate of technical science, docent, head of chair, poteryaev_ik@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile and Road University

УДК 681.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-96-97

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА, МОНИТОРИНГ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

И.А. Кочанов, А.С. Мусиенко, Г.М. Горохов

В статье предложена имитационная модель оценивания автономности космического аппарата с учетом показателей надежности и характеристик контроля. Процесс контроля бортовых систем космического аппарата описан с помощью графа состояний в среде Stateflow программного продукта Matlab. Полагается, что бортовые средства контроля функционируют автономно и обращаются к наземным средствам после того, как зафиксирован отказ бортового оборудования космического аппарата. Разработанная имитационная модель позволяет учитывать ошибки и периодичность контроля, а также показатели надежности космического аппарата.
Ключевые слова: автономность, надежность, контроль, космический аппарат, имитационная модель.

В настоящее время одним из основных направлений развития целого ряда сложных технических устройств, таких как робототехнические платформы, беспилотные летательные аппараты, космические аппараты (КА) является повышение их автономности функционирования. Одним из путей повышения автономности данных объектов, в частности, КА, является дальнейшее совершенствование бортовых средств контроля и диагностирования технического состояния, увеличение объема задач по выявлению сбоев, неисправностей и отказов, решаемых бортовые средства контроля (диагностирования), и, как следствие, уменьшение сеансов связи с наземными комплексами управления. В связи с этим задача получения и исследования аналитических зависимостей и имитационных моделей, связывающих показатели надежности, характеристики средств контроля (диагностирования) и автономности КА, является весьма актуальной.

Имитационная модель для оценивания автономности космического аппарата с учетом показателей надежности и контроля. Процесс контроля КА может быть описан с помощью марковского процесса, граф которого изображен на рисунке 1.

В качестве состояний моделируемого процесса контроля выступают работоспособное и неработоспособное виды технического состояния КА (S_0, $\overline{S_0}$), в которых контроль не проводится (т.е. «рабочий режим»); а также состояния $R_1 - R_4$, при которых производится контроль, где: R_1, R_3 — состояния, при которых проводится контроль с достоверным результатом (S_0^*/S_0 — система контроля фиксирует работоспособное состояние S_0^*, при этом КА действительно работоспособен S_0, $\overline{S_0^*}/\overline{S_0}$ — система контроля обнаруживает неработоспособное состояние $\overline{S_0^*}$, при этом КА действительно неработоспособен $\overline{S_0}$); R_2, R_4 — состояния, при которых проводится контроль с ошибочным результатом ($\overline{S_0^*}/S_0$ — система контроля обнаруживает неработоспособное состояние $\overline{S_0^*}$, а при этом КА работоспособен S_0, $S_0^*/\overline{S_0}$ — система контроля фиксирует работоспособное состояние S_0^*, а при этом КА неработоспособен $\overline{S_0}$). (рис. 1).

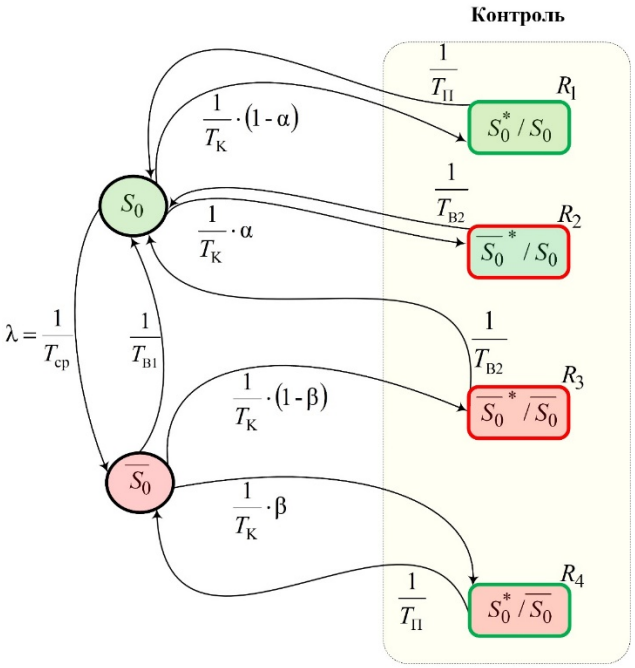


Рис. 1. Марковский процесса, связывающий показатели надежности и контроля

На рисунке 1 также введены следующие обозначения: α , β — вероятности ошибок контроля (ошибок 1-го и 2-го рода); $T_{СР}$ — средняя наработка на отказ; $T_К$ — периодичность контроля; $T_{В1}$ — среднее время восстановления без применения средств контроля, т. е. предполагается, что КА можно восстановить даже при отсутствии или отказе средств контроля, например, с помощью последовательного переключения на резервные блоки до тех пор, пока система не станет работоспособной, очевидно, что на это может потребоваться значительное время и ресурсы. Если без контроля КА не может быть восстановлен, то $T_{В1} \to \infty$; $T_{В2}$ — среднее время восстановления с учетом контроля; $T_П$ — средняя продолжительность перевода КА из режима контроля в рабочий режим. Если контроль происходит параллельно с работой КА (функциональный контроль), то $T_П$ =0, но если производится тестовый контроль, при котором КА последовательно переводится из режима контроля в рабочий режим и обратно, то необходимо учитывать $T_П$.

Анализ графа (см. рис. 1) позволяет составить систему алгебраических уравнений (1) для нахождения финальных вероятностей состояний соответственно:

$$\begin{cases} -\left(\frac{1}{T_К}+\frac{1}{T_{СР}}\right)\cdot P_{S_0}+\frac{1}{T_{В1}}\cdot P_{\overline{S_0}}+\frac{1}{T_П}\cdot P_{R_1}+\frac{1}{T_{В2}}\cdot\left(P_{R_2}+P_{R_3}\right)=0; \\ \frac{1}{T_{СР}}\cdot P_{S_0}-\left(\frac{1}{T_К}+\frac{1}{T_{В1}}\right)\cdot P_{\overline{S_0}}+\frac{1}{T_П}\cdot P_{R_4}=0; \\ \frac{1-\alpha}{T_К}\cdot P_{S_0}-\frac{1}{T_П}\cdot P_{R_1}=0; \\ \frac{\alpha}{T_К}\cdot P_{S_0}-\frac{1}{T_{В2}}\cdot P_{R_2}=0; \\ \frac{1-\beta}{T_К}\cdot P_{\overline{S_0}}-\frac{1}{T_{В2}}\cdot P_{R_3}=0; \\ \frac{\beta}{T_К}\cdot P_{\overline{S_0}}-\frac{1}{T_П}\cdot P_{R_4}=0. \end{cases} \quad (1)$$

Под коэффициентом автономности КА будем понимать вероятность его нахождения в состояниях, при которых КА не обращается к средствам наземного комплекса управления (НКУ) и при этом работоспособен. Исходя из графа, изображенного на рис. 1, КА имеет три состояния: S_0 , S_0^*/S_0 , $\overline{S_0^*}/S_0$, при которых он работоспособен. Но в состоянии $\overline{S_0^*}/S_0$ по результатам контроля КА признается отказавшим (ошибочный результат контроля), КА необходимо восстанавливать, а значит происходит обращение к НКУ, следовательно, данное состояние не может рассматриваться при расчете коэффициента автономности. При этом в состоянии $S_0^*/\overline{S_0}$ система контроля не обнаруживает отказ и обращение к НКУ не происходит, но при этом КА неработоспособен, а значит при расчете автономного функционирования нельзя учитывать вероятность данного состояния (так как КА не функционирует).

Таким образом, для определения коэффициента автономности необходимо определить сумму финальных вероятностей состояний S_0^*/S_0 и S_0:

$$K_{\text{А}} = 1 - \left(P(\overline{S_0^*}/S_0) + P(\overline{S_0^*}/\overline{S_0}) + P(S_0^*/\overline{S_0}) + P(\overline{S_0}) \right) = P(S_0^*/S_0) + P(S_0) . \quad (2)$$

Время автономного функционирования можно получить, зная $K_{\text{А}}$ – коэффициент автономности КА (т.е. долю времени, когда КА автономно функционирует) и $T_{\text{срок\_активн\_сущ}}$ – срок активного существования КА, по следующей формуле:

$$T_{\text{автоном\_функц}} = K_{\text{А}} \cdot T_{\text{срок\_активн\_сущ}} . \quad (3)$$

Добавим уравнения нормировки для однозначного решения систем уравнений (1) – $P_{S_0} + P_{\overline{S_0}} + P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + P_{R_4} = 1$ соответственно, что справедливо, так как все шесть состояний образуют полную группу событий.

Решение системы уравнений (1) позволяет получить формулу для коэффициента автономности с учетом показателей надежности и таких характеристик и показателей контроля, как достоверность (через ошибки α и β), периодичность ($T_{\text{К}}$) и продолжительность ($T_{\text{П}}$) контроля:

$$K_{\text{А}} = P_{S_0} + P_{S_0^*/S_0} = \frac{T_{\text{СР}} \cdot \left(T_{\text{К}} \cdot \left(T_{\text{В1}} \cdot (1-\beta) + T_{\text{К}}\right) + T_{\text{П}} \cdot \left(T_{\text{В1}} \cdot (1-\beta+\alpha\cdot\beta-\alpha) + T_{\text{К}} \cdot (1-\alpha)\right)\right)}{T_{\text{СР}} \cdot T_{\text{В1}} \cdot (1-\beta) \cdot \left(T_{\text{В2}} \cdot \alpha + T_{\text{П}} \cdot (1-\alpha)\right) + T_{\text{СР}} \cdot T_{\text{К}} \cdot \left(T_{\text{П}} \cdot (1-\alpha) + T_{\text{В1}} \cdot (1-\beta)\right) + T_{\text{К}} \cdot \left(T_{\text{В1}} \cdot T_{\text{В2}} \cdot (1-\beta) + T_{\text{К}} \cdot (T_{\text{СР}} + T_{\text{В1}}) + T_{\text{СР}} \cdot T_{\text{В2}} \cdot \alpha + T_{\text{П}} \cdot T_{\text{В1}} \cdot \beta\right)} \quad (4)$$

Если проводится только функциональный контроль, то $T_{\text{П}} = 0$ и формула (4) преобразуется в следующий вид:

$$K_{\text{А}} = \frac{T_{\text{СР}} \cdot T_{\text{К}} \cdot \left(T_{\text{В1}} \cdot (1-\beta) + T_{\text{К}}\right)}{T_{\text{СР}} \cdot T_{\text{В1}} \cdot (1-\beta) \cdot T_{\text{В2}} \cdot \alpha + T_{\text{СР}} \cdot T_{\text{К}} \cdot T_{\text{В1}} \cdot (1-\beta) + T_{\text{К}} \cdot \left(T_{\text{В1}} \cdot T_{\text{В2}} \cdot (1-\beta) + T_{\text{К}} \cdot (T_{\text{СР}} + T_{\text{В1}}) + T_{\text{СР}} \cdot T_{\text{В2}} \cdot \alpha\right)} \quad (5)$$

Если проводится тестовый контроль без ошибок ($\alpha = 0, \beta = 0$), то формула (4) примет вид:

$$K_{\text{А}} = \frac{T_{\text{СР}} \cdot \left(T_{\text{В1}} + T_{\text{К}}\right) \cdot \left(T_{\text{К}} + T_{\text{П}}\right)}{T_{\text{СР}} \cdot T_{\text{В1}} \cdot T_{\text{П}} + T_{\text{СР}} \cdot T_{\text{К}} \cdot \left(T_{\text{П}} + T_{\text{В1}}\right) + T_{\text{К}} \cdot \left(T_{\text{В1}} \cdot T_{\text{В2}} + T_{\text{К}} \cdot (T_{\text{СР}} + T_{\text{В1}})\right)} . \quad (6)$$

Если проводится функциональный контроль без ошибок ($\alpha = 0$, $\beta = 0$, $T_{\text{П}} = 0$), то формула (4) преобразуется и приобретает следующий вид:

$$K_{\text{А}} = \frac{T_{\text{СР}} \cdot \left(T_{\text{В1}} + T_{\text{К}}\right)}{T_{\text{СР}} \cdot \left(T_{\text{В1}} + T_{\text{К}}\right) + T_{\text{В1}} \cdot \left(T_{\text{К}} + T_{\text{В2}}\right)} . \quad (7)$$

Если контроль вообще не учитывать (т.е. $T_{\text{К}} \to \infty$), то формула (4) упростится до известной из теории надежности систем формулу для коэффициента готовности [1, 3, 8, 9]:

$$K_{\text{А}} = \frac{T_{\text{СР}}}{T_{\text{СР}} + T_{\text{В1}}} = K_{\Gamma} . \quad (8)$$

Т.е. коэффициент автономности будет зависеть только лишь от показателей надежности КА, так как не учитывались характеристики контроля.

Для построения имитационной модели, изображенной на рисунке 2, была использована среда Stateflow программного продукта Matlab.

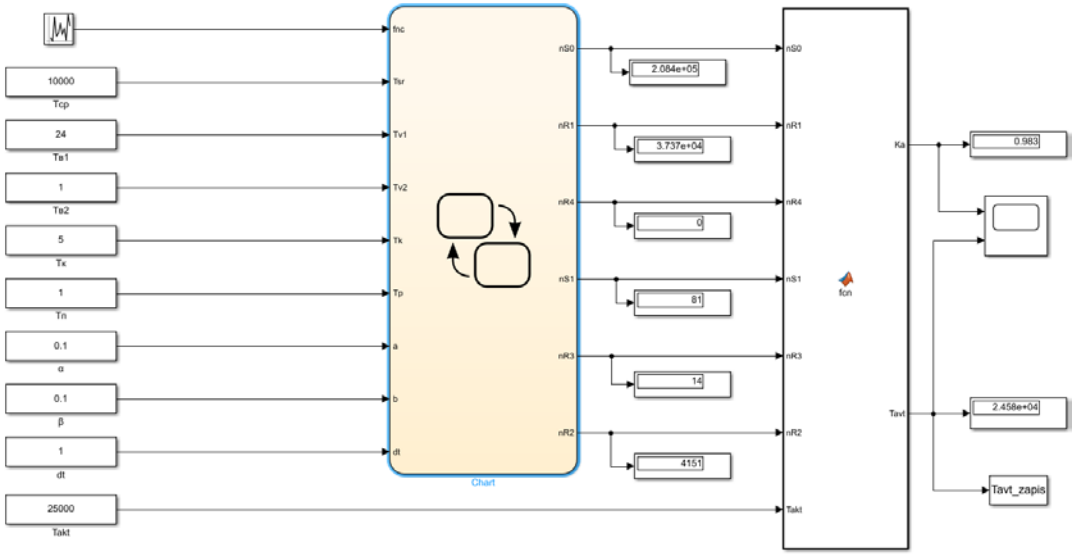


Рис. 2. Имитационная модель в среде Stateflow программного продукта Matlab

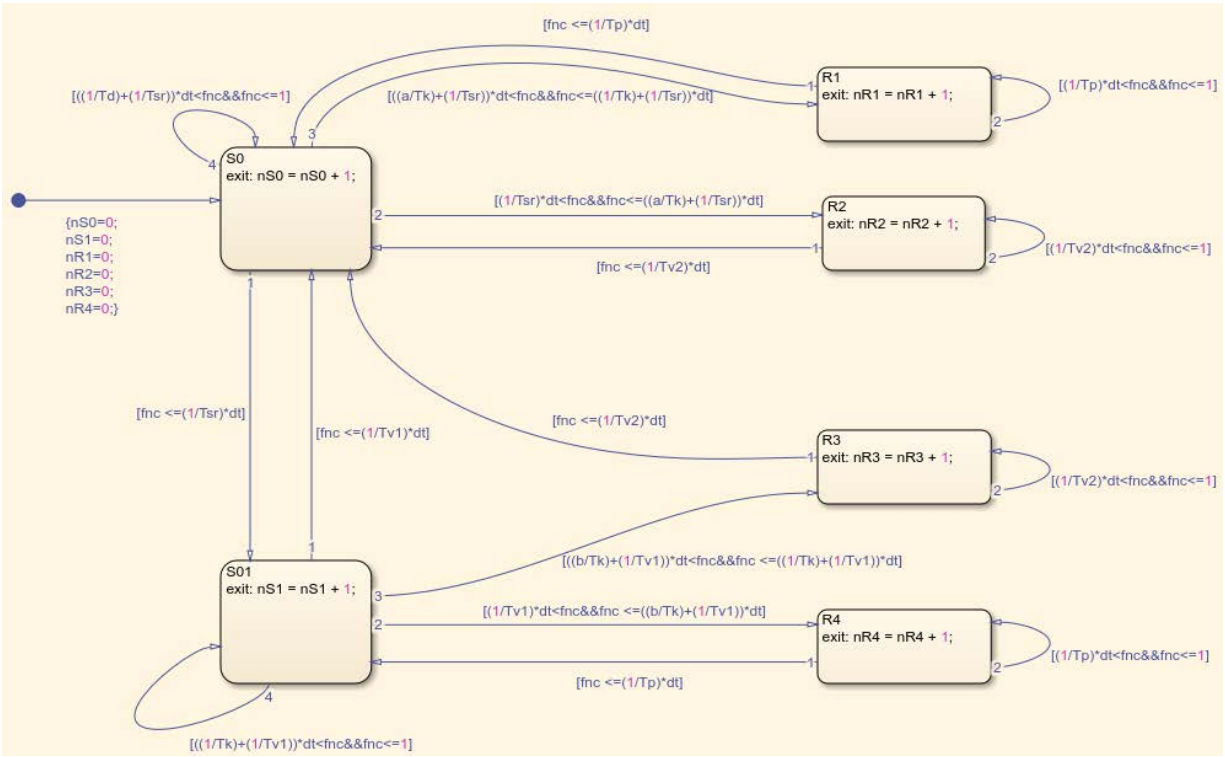


Рис. 3. Содержание блока Chart имитационной модели

Для проверки на адекватность сначала влияние контроля и диагностирования не рассматривалось ($T_{\text{К}} \to \infty$). При этом коэффициент автономности вычисляется по формуле (8) и равен: $K_{\text{А}} \approx 0.625$.

На рисунке 4 представлены результаты расчета коэффициента автономности с помощью имитационного моделирования.

Исходными данными для имитационного моделирования являлись следующие значения: $T_{\text{СР}}$ =100 ч, $T_{\text{В1}}$ =60 ч, $T_{\text{В2}}$ =1 ч, $T_{\text{К}}$ =1000000 ч (т.е. период контроля очень большой: $T_{\text{К}} \to \infty$); $T_{\text{П}}$ =1 ч, $\alpha = \beta = 0$.

Далее при имитационном моделировании учитывались только достоверные результаты контроля и диагностирования (т.е. $\alpha = \beta = 0$), при этом $T_{\text{К}}$ =5 ч. На рисунке 5 представлены результаты имитационного моделирования.

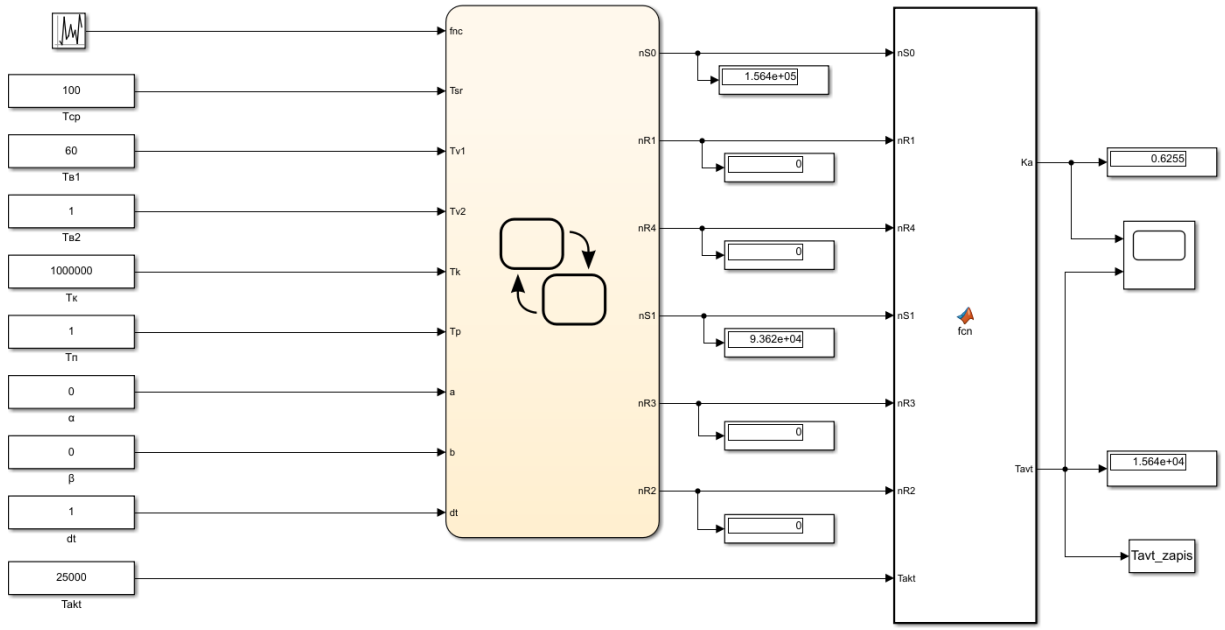


Рис. 4. Зависимость коэффициента автономности от времени без учета влияния контроля (диагностирования) (начало)

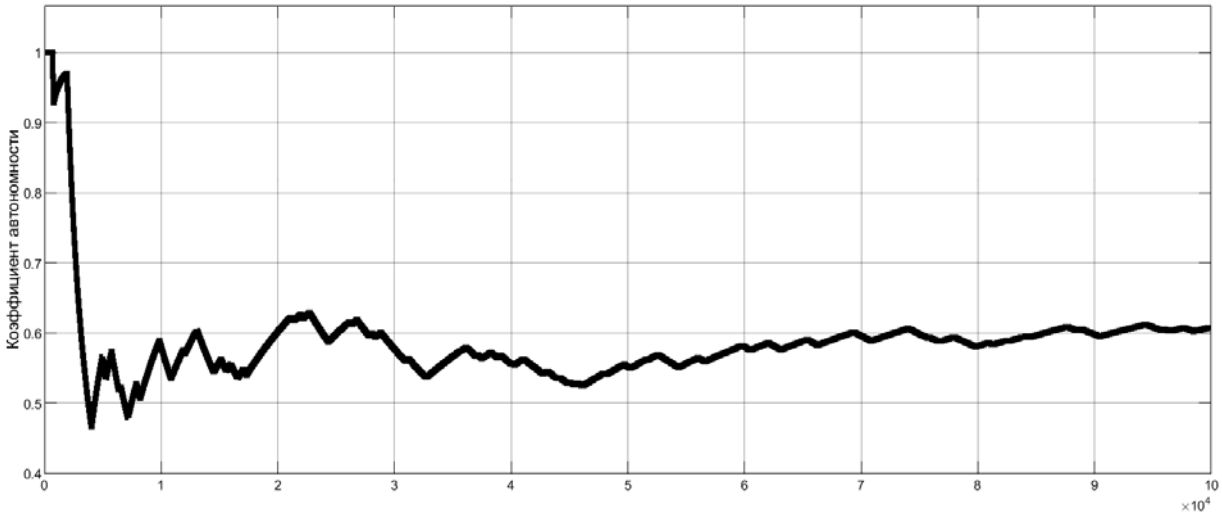


Рис. 4. Зависимость коэффициента автономности от времени без учета влияния контроля (диагностирования) (окончание)

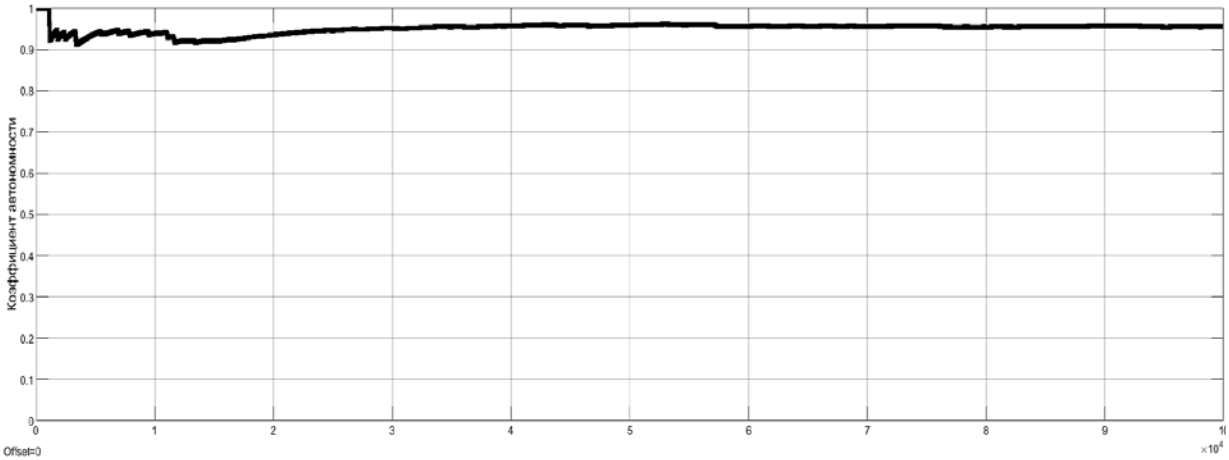


Рис. 5. Зависимость коэффициента автономности от времени с учетом влияния контроля, но без учета ошибочных решений

Значение коэффициента автономности, вычисленное по аналитической модели, равно 0.948.

Затем учитывались ошибки 1-го и 2-го рода. Исходными данными для имитационного моделирования являлись следующие значения: $T_{СР}$ =100 ч, $T_{В1}$ =60 ч, $T_{В2}$ =1 ч, $T_К$ =5 ч; $T_П$ =1 ч, α =0.2, β =0.3.

На рисунке 6 представлены результаты имитационного моделирования.

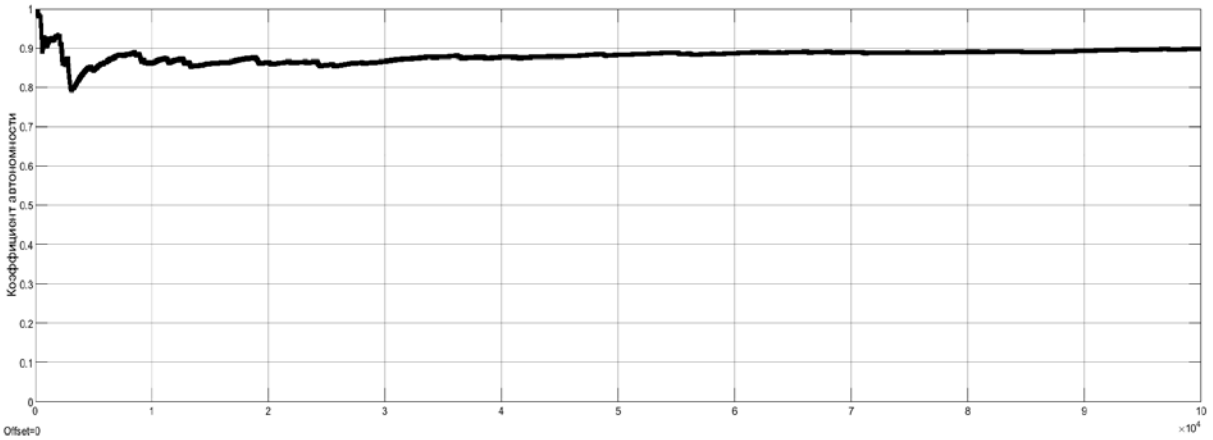


Рис. 6. Зависимость коэффициента автономности от времени с учетом показателей контроля

Значение коэффициента автономности, вычисленное по аналитической модели, равно 0.899.

Таким образом, с помощью разработанной имитационной модели были получены результаты, практически совпадающие с результатами вычислений по аналитической модели. Незначительные расхождения объясняются тем, что имитационная модель выдает конкретную реализацию работы комплекса, а аналитическая модель – обобщенную усредненную оценку. Повторив несколько раз эксперимент с имитационной моделью при одних и тех же исходных данных и обработав полученные результаты, можно получить полное совпадение результатов имитационной и аналитической моделей. При этом имитационная модель имеет ряд преимуществ по сравнению с аналитической моделью, а именно:

1. Аналитическое представление подходит лишь для простых объектов. Для сложных технических объектов при составлении графа состояний необходимо учитывать различные режимы эксплуатации, больше состояний объекта, а, следовательно, значительно вырастет уровень сложности аналитического решения систем уравнений. К сожалению, аналитические решения не для всех задач можно найти.
2. Данная имитационная модель в отличие от аналитической представляет не конечную систему уравнений, а развернутую схему с детально описанной структурой и поведением объекта.
3. Разработанную имитационную модель можно постепенно усложнять, дорабатывать, модифицировать. В качестве входных параметров, например $T_{\text{СР}}$, $T_{\text{Д}}$, использовать не константы, а изменяющиеся величины. Например, объект может иметь различную $T_{\text{СР}}$ в зависимости от режима эксплуатации (для этапа приработки бортовой аппаратуры одно значение $T_{\text{СР}}$, для нормальной эксплуатации – другое). В справочных данных указывается, что средняя наработка на отказ в данных режимах может различаться примерно в $\left(10^2 \div 10^3\right)$ раз.

Заключение. Результаты, полученные с помощью имитационной модели, способствуют выявлению связи между уровнем автономности космических аппаратов и значениями показателей надежности элементов, оцениванию влияния таких показателей и характеристик бортовых средств контроля как периодичность достоверность, продолжительность. Научная и практическая значимость полученных результатов заключается в комплексном рассмотрении вопросов надежности и контроля космических аппаратов.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости повышения достоверности контроля бортовой аппаратуры (БО) КА, что приведет к уменьшению вероятности попадания в состояния с ошибочным контролем и уменьшением обращений в НКУ, следовательно, повышением коэффициента автономности в целом. Также одним из способов повышения автономности КА является повышение надежности БО КА. С помощью разработанных имитационных моделей можно формировать и обосновывать требования к надежности элементов космического аппарата, а также к характеристикам бортовых средств контроля и диагностирования, исходя из требований к автономности космического аппарата, а также корректировать периодичность контроля и диагностирования космического аппарата с учетом требований по автономности.

Список литературы

1. Дорожко И.В. Имитационная модель оценивания автономности космических аппаратов с учетом характеристик процесса контроля и диагностирования / И.В. Дорожко, А.Н. Скрипников, Е.А. Захарова // Сборник трудов XXII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (1-4 апреля 2019 г.) «Актуальные проблемы защиты и безопасности». М.: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2019. С.301-306.
2. Дорожко И.В. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем / И.В. Дорожко, И.А. Кочанов, Н.А. Осипов, А.В. Бутырин // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. СПб., 2016. № 652. С. 137 – 146.
3. Мальцев Г.Н. Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования / Г.Н. Мальцев, А.В. Назаров, В.Л. Якимов // Труды СПИИРАН. 2018. № 1(56). С. 95-121.
4. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-15. – Введ. 2017-03-01. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.
5. Stateflow® and Stateflow® Coder™ User's Guide 2017 by The MathWorks, Inc.
6. Технические средства диагностирования: Справочник / [В.В. Клюев и др.]; под общ. ред В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1989. 671 с.
7. Кудрявцев В.В. Основы контроля и диагностики // ВИККИ им. А.Ф. Можайского. 1993. 157 с.
8. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения: ГОСТ Р 27.102-2021. Введ. 2021-10-08. М.: ФГБУ «РСТ», 2021. 45 с.
9. Воронцов В.А. Разработка прототипа интеллектуальной системы оперативного мониторинга и технического состояния основных бортовых систем космического аппарата / В.А. Воронцов, Е.А. Федоров // Труды МАИ. 2015. № 82. С. 35.
10. Заведеев А.И. Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата / А.И. Заведеев, А.Ю. Ковалев // Труды МАИ. 2012. № 54. С. 3.
11. Техническая диагностика. Термины и определения: ГОСТ В 20.911-89. Введ. 1991-01-01. М.: Издательство стандартов, 1990. 12 с.
12. Технические средства диагностирования: Справочник / [В.В. Клюев и др.]; под общ. ред В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1989. 671 с.
13. Бочкарев С.В., Цаплин А.И. Диагностика и надежность автоматизированных систем. Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2008. 485 с.
14. Гуменюк В.М. Надежность и диагностика электротехнических систем: учебное пособие для вузов. Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. 218 с.
15. Гусеница Я.Н., Дорожко И.В., Кочанов И.А., Петухов А.Б. Научно-методический подход к оцениванию готовности сложных технических комплексов с учетом метрологического обеспечения / Я.Н. Гусеница, И.В. Дорожко, И.А. Кочанов, А.Б. Петухов // Труды МАИ. М., 2018. № 98 С. 20.

16. Дорожко И.В. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических комплексов с учетом показателей контроля и диагностирования технического состояния / И.В. Дорожко, А.Л. Копейка, Н.А. Осипов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2019. № 671. С. 303-313.

17. Дорожко И.В., Кочанов И.А., Осипов Н.А., Бутырин А.В. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем / И.В. Дорожко, И.А. Кочанов, Н.А. Осипов, А.В. Бутырин // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. СПб., 2016. № 652. С. 137 – 146.

18. Копейка Е.А. Методический подход оценивания вероятности безотказной работы сложных технических систем с учетом характеристик системы контроля на основе байесовской сети доверия / Е.А. Копейка, А.В. Вербин // Труды МАИ. 2023. № 128. [Электронный ресурс] URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=171411 (дата обращения: 10.05.2024).

19. Лубков Н.В. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем / Н.В. Лубков, И.Б. Спиридонов, А.С. Степанянц // Труды МАИ. М., 2016. № 85. С. 10.

20. Привалов А.Е. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических систем с учетом характеристик процесса диагностирования / А.Е. Привалов, И.В. Дорожко, Е.А. Захарова, А.Л. Копейка // Труды МАИ. М., 2018. № 103. С. 28.

21. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.

22. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: учебное пособие. СПб.: Питер, 2005. 479 с.

23. Stateflow. Разработка и симуляция машин состояний и конечных автоматов. [Электронный ресурс] URL: https://matlab.ru/products/stateflow/stateflow_rus_web.pdf (дата обращения: 10.05.2024).

24. Agrawal A., Simon G., Karsai G.: Semantic translation of Simulink/Stateflow models to hybrid automata using graph transformations. Int. Workshop Graph Transform. Visual Model. Tech. 109, 43–56 (2004).

25. Hamon G., Rushby J. An operational semantics for Stateflow. Int. J. Softw. Tools Technol. Transf. 9(5), 447–456 (2007).

26. MathWorks. Stateflow. [Электронный ресурс] URL: https://www.mathworks.com/help/stateflow/index.html (дата обращения: 10.05.2024).

27. Steven T. Karris Introduction to StateFlow with Applications 1st Edition. Orchard Publications, 2017. 520 p.

Кочанов Игорь Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Мусиенко Анатолий Сергеевич, адъюнкт, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Горохов Георгий Михайлович, курсант, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

THE TECHNIQUE OF MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF A COMPLEX TECHNICAL DEVICE, MONITORING RELIABILITY INDICATORS.

I.A. Kochanov, A.S. Musienko, G.M. Gorokhov

The article proposes a simulation model for evaluating the autonomy of a spacecraft, taking into account reliability indicators and control characteristics. The process of monitoring the onboard systems of the spacecraft is described using a state graph in the Stateflow environment of the Matlab software product. It is assumed that the on-board controls function autonomously and switch to ground-based facilities after a failure of the spacecraft's on-board equipment is detected. The developed simulation model allows us to take into account the errors and frequency of monitoring, as well as the reliability indicators of the spacecraft.

Key words: autonomy, reliability, control, spacecraft, simulation model.

Kochanov Igor Anatolyevich, candidate of technical sciences, docent, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Anatoly Sergeevich Musienko, adjunct, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Gorokhov Georgy Mikhailovich, cadet, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky

УДК 658.562
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-103-104

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ОБУВИ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

О.А. Голубева, В.П. Димитров, А.С. Доний, К.А. Швецов

В статье рассматриваются возможности применения метода анализа иерархий (МАИ) и регрессионного анализа в автоматизированной системе «Shoescom» для многокритериальной оценки качества технологических процессов производства обуви. Применение метода МАИ позволяет ранжировать показатели качества и определить наиболее значимые. Регрессионный анализ помогает выявить количественные взаимосвязи между параметрами процесса и показателями качества продукции. На основании анализа результатов система «Shoescom» формулирует конкретные рекомендации для улучшения процесса, что подтверждает высокую точность и обоснованность предложенных решений.

Ключевые слова: управление качеством, контроль качества, анализ дефектов, обувное производство, автоматизированная система.

Современное производство обуви сталкивается с комплексными задачами в области управления качеством, включая необходимость учитывать широкий спектр показателей, таких как физико-химические свойства материалов, соблюдение режимов температуры и давления, а также профессиональная подготовка операторов. В условиях многокритериальности и разнородности данных возникает потребность в объективном анализе системы показателей качества, чтобы выделить наиболее значимые и улучшить контроль качества продукции.

Практическое применение метода анализа иерархий (МАИ) и регрессионного анализа позволяет оптимизировать подход к оценке качества. МАИ используется для построения вектора приоритетов (значимости) анализируемых показателей и оценки качества на основе парных сравнений. Регрессионный анализ выявляет количественные взаимосвязи между параметрами процесса. В рамках системы «Shoescom» интеграция этих методов позволяет оперативно получать данные о влиянии каждого фактора на качество продукции и точно настраивать производственный процесс.

Методы исследования. Использование МАИ и регрессионного анализа в комплексе усиливает возможности системы «Shoescom» [1, 2]:

- МАИ обеспечивает ранжирование показателей по их важности, предоставляя структуру, которая облегчает анализ.
- Регрессионный анализ позволяет количественно оценить влияние каждого внешнего фактора на показатели качества продукции.

Эта комбинация методов помогает оперативно принять обоснованные решения и эффективно распределять ресурсы на основе данных, что соответствует одному из основных принципов создания СМК [3, 4].

Метод анализа иерархий, разработанный американским математиком Т. Саати, широко используется для решения задач, где необходимо учитывать многообразие параметров процессов и критериев оценки качества продукции. В основе МАИ лежит принцип декомпозиции: сложная задача делится на иерархические уровни, что позволяет структурировать и оценивать значимость различных факторов по их влиянию на конечную цель [5]. Основные этапы реализации метода отражены на рис. 1.

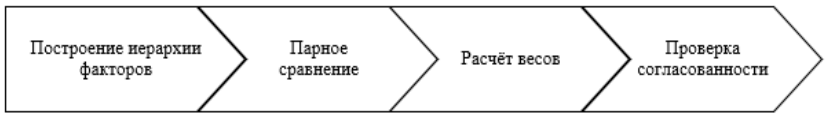


Рис. 1. Основные этапы метода МАИ

На первом этапе задача формализуется посредством иерархической структуры, которая включает нескольких уровней. На верхнем уровне находится основная цель (например, повышение качества продукции), ниже - ключевые группы факторов (такие как материалы, методы, оборудование), а на следующих уровнях - конкретные параметры каждого фактора.

Для оценки важности факторов относительно друг друга выполняется парное сравнение. Например, в обувном производстве можно сравнить важность температуры прессования и качества материалов для предотвращения дефектов. Оценки задаются на основе субъективных предпочтений и экспертного опыта, используя 9-балльную шкалу, где 1 означает равное значение, а 9 — наибольшее доминирование одного фактора над другим [5].

Результаты парных сравнений объединяются в матрицу, на основе которой вычисляются относительные веса факторов. Вес каждого фактора нормализуется и рассчитывается его вклад в общее значение.

Индекс согласованности (CI) и отношение согласованности (CR) используются для оценки адекватности полученной информации. CR ниже 0,1 указывает на приемлемую согласованность, что свидетельствует о высокой надёжности полученных результатов. Этот шаг важен для подтверждения, что экспертные оценки адекватны и согласуются между собой.

К преимуществам метода можно отнести учет субъективных факторов и экспертных мнений, что полезно при многокритериальной оценке в условиях неопределённости. А также то, что метод обеспечивает структурированный подход к анализу сложных задач и помогает выявить наиболее значимые факторы, влияющие на достижение цели [6].

В системе «Shoescom» МАИ применяется для анализа факторов, влияющих на качество, что позволяет оптимизировать производственные процессы и сфокусировать ресурсы на ключевых параметрах, таких как температура и качество материалов. Исходные данные автоматически обрабатываются в программном комплексе. Пример диалогового окна для вводы данных приведет на рис. 2.

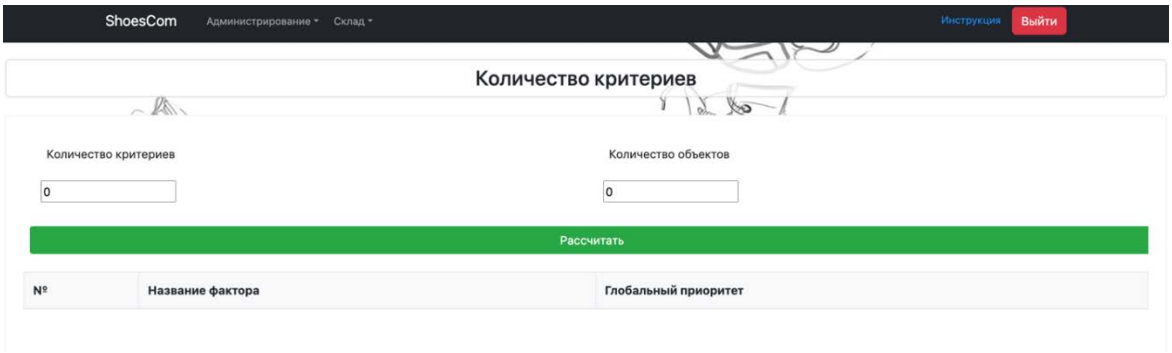


Рис. 2. Диалоговое окно «Метод анализа иерархий»

Рассмотрим этапы реализации данного метода в рамах программного комплекса.

1. **Построение иерархической структуры факторов.** Сначала в системе «Shoescom» строится иерархия факторов, влияющих на качество. Верхний уровень представляет собой основную цель - обеспечение высокого качества продукции. На втором уровне выделяются ключевые группы факторов: температура прессования, качество материалов, квалификация персонала и состояние оборудования (табл. 1).

Таблица 1

Уровни иерархии и элементы, относящие к ним

Уровень иерархии	Элемент
1-й уровень (цель)	Обеспечение высокого качества продукции
2-й уровень (факторы)	Температура прессования. Качество материалов. Квалификация персонала, состояние оборудования

2. Парное сравнение факторов. В системе «Shoescom» производится парное сравнение факторов для оценки их относительной важности. Например, температура и качество материалов могут быть признаны более значимыми для предотвращения дефектов, чем состояние оборудования.

Таблица 2

Вектор приоритетов

Параметры	К1	К2	К3	К4		вектор
К1	1	3/1	7/1	5/1	3,201	0,564
К2	1/3	1	5	3	1,495	0,263
К3	1/7	1/5	1	1/3	0,312	0,055
К4	1/5	1/3	3/1	1	0,669	0,118

В табл. 2 введены следующие обозначения: К1 - температура прессования; К2 - качество материалов; К3 - квалификация персонала; К4 - состояние оборудования.

Значение 3/1 в строке «Температура прессования» (К1) и колонке «Качество материалов» (К2) означает, что температура прессования имеет умеренное превосходство над качеством материалов по влиянию на качество продукции. С другой стороны, значение 1/7 в строке «Квалификация персонала» (К3) и колонке «Температура прессования» (К1) означает, что квалификация персонала имеет значительно меньшее влияние по сравнению с температурой прессования.

На основе полученной матрицы производится расчет весов (приоритетов) каждого критерия. Эти значения показывают относительное влияние каждого фактора на качество продукции. Температура прессования и качество материалов оказывают наибольшее влияние, поэтому система «Shoescom» рекомендует сосредоточить усилия на контроле этих параметров.

3. Проверка согласованности. Чтобы убедиться, что оценки согласованы, рассчитываем индекс согласованности (CI) и отношение согласованности (CR). Расчёт данных показателей ведется на основе максимального собственного значения λmax [5]. Поскольку CR = 0,045, что меньше порога 0,1, то согласованность оценок можно считать допустимой и утверждать, что оценки, полученные для факторов, адекватно отражают фактическую ситуацию.

4. Оценка результата. Таким образом, результаты использования МАИ подтверждают, что наибольшее влияние на качество продукции оказывают температура прессования (вес 0,564) и качество материалов (вес 0,263).

Регрессионный анализ — это метод статистического моделирования, который описывает взаимосвязь между зависимой переменной и одной или несколькими независимыми переменными [6 - 8]. В управлении качеством регрессионный анализ помогает установить количественные связи между параметрами производственного процесса и показателями качества продукции, позволяя прогнозировать, как изменения параметров повлияют на конечный результат (рис. 3).

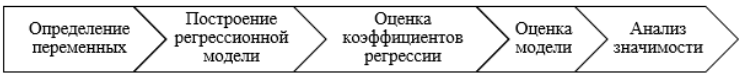


Рис. 3. Основные этапы регрессионного анализа

На первом этапе идентифицируются зависимая переменная (например, качество продукции) и независимые переменные, влияющие на неё (например, температура, качество материалов, время прессования).

Формируется математическое уравнение, описывающее зависимость между переменными. Например, если качество прессования деталей верха обуви зависит от температуры и давления, то регрессионная модель будет иметь вид:

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\varepsilon,$$

где: β_0 - свободный член; β_1 и β_2 - коэффициенты регрессии; X_1 -температура; X_2 – давление; ε - случайная ошибка.

Задача - построить регрессионную модель, которая описывает влияние каждого фактора на процесс производства обуви. Выбраны три ключевых параметра:

1. Температура прессования деталей верха межподкладкой «температура прессования» (в °С) - X_1
2. Качество применяемых кож для верха обуви и наименование клея «качество материалов» (оценка по 10-балльной шкале) - X_2
3. Уровень квалификации оператора пресса «квалификация персонала» (оценка по 10-балльной шкале) - X_3

Зависимая переменная – Y: «качество продукции» (в процентах, от 0 до 100%).

В качестве примера для построения регрессионной модели использовались экспериментальные данные, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Данные для регрессионной модели

Наблюдение	Температура прессования X_1	Качество материалов X_2	Квалификация персонала X_3	Качество продукции Y
1	170	8	9	85
2	175	9	8	88
3	180	7	8	80
4	165	8	7	78
5	172	9	9	90
6	169	8	8	82
7	174	7	7	76
8	177	9	8	89
9	168	6	6	72
10	171	8	8	84

Исходные данные автоматически обрабатываются в программном комплексе. Пример диалогового окна для ввода данных приведен на рис. 4.

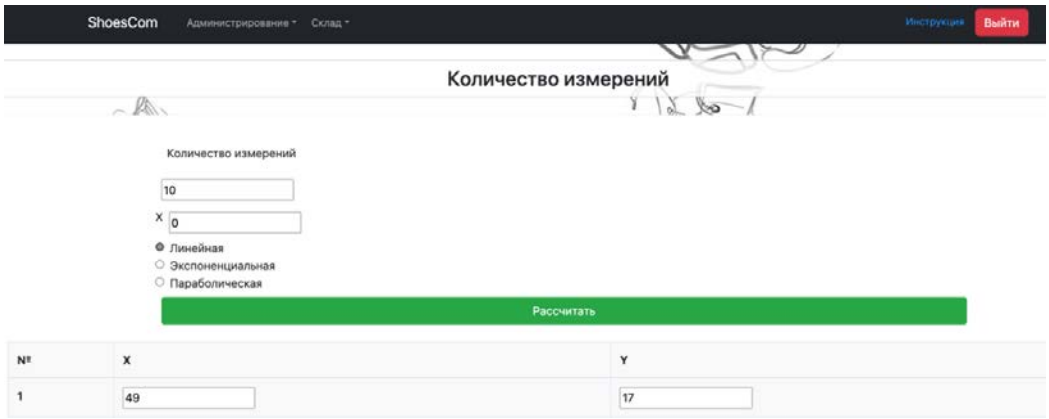


Рис. 4. Диалоговое окно «Регрессионный анализ»

В результате построена модель множественной линейной регрессии в виде:

$$Y=5,0_0+ 0,5X_1+2,1X_2+1,2X_3$$

Расчётное значение коэффициента детерминации $R^2=0,87$, означает, что 87% вариаций в качестве продукции объясняются изменениями в температуре прессования, качестве материалов и квалификации персонала.

На основе построенной модели можно сделать следующие выводы и предложить рекомендации.

- Температура клея во время дублирования деталей верха межподкладкой на этапе прессования оказывает значительное влияние на качество обуви, тем самым убирает излишнюю тягучесть кож, поэтому рекомендуется установить систему автоматического контроля и мониторинга температурного режима на каждом этапе технологического процесса для дублирования материалов.
- Контроль качества кожевенных материалов верха обуви на наличие пороков кож и качество клея при получении товара на склад приводит к заметному улучшению качества выпускаемой обуви. Следовательно, стоит усилить контроль входящих материалов и работать с проверенными поставщиками.
- Уровень квалификации операторов станков для прессования для дублирования межподкладки также положительно влияет на качество продукции, поэтому рекомендуется проводить регулярное обучение сотрудников и повышение их квалификации.

Этот пример демонстрирует, как с помощью регрессионного анализа можно выявить значимые факторы и предсказать качество продукции, что помогает оптимизировать производственные процессы и эффективно управлять качеством.

В системе «Shoescom» регрессионный анализ используется для выявления ключевых зависимостей между параметрами производства и показателями качества продукции. Это позволяет получать объективные количественные оценки и обоснованные рекомендации для корректировки параметров [9].

Результаты и обсуждение. Результаты применения метода МАИ, реализованного в «Shoescom», показали, что наиболее значимые факторы — это температура прессования и качество материалов. Полученные веса факторов, следующие:

Температура прессования — 0,564;
Качество материалов — 0,263;
Квалификация персонала — 0,055;
Состояние оборудования — 0,118.

Эти данные позволили сосредоточить усилия на управлении температурными режимами во время дублирования материалов верха межподкладкой и повышении качества используемых материалов, что непосредственно повлияло на снижение числа дефектов продукции.

Регрессионный анализ выявил, что изменения температуры и наименование используемого клея на этапе прессования для дублирования межподкладки в обуви оказывают значительное влияние на качество продукции.

Примеры конкретных расчётов.

1. Температурный режим: Увеличение температуры на этапе прессования и дублирования межподкладки к кожевенному верху обуви на 2°C при норме 170°C. Система выявила, что такое изменение привело к снижению возможности появления дефектов по сравнению с изначальным значением.

2. Качество материалов: повышение качества клея на 1 балл по 10 -балльной шкале снизило дефекты на 2%, подтверждая, что выбор высококачественного клея на этапе прессования обувных материалов играет значительную роль, так как снижает тягучесть материалов и убирает возможность разрыва во время эксплуатации.

Заключение. Система «Shoescom», использующая методы МАИ и регрессионный анализ, позволяет точно определить ключевые факторы качества и выявить корреляции между параметрами процесса и качеством продукции. Это даёт возможность оперативно адаптировать производственный процесс, предотвращая дефекты и оптимизируя затраты.

Интеграция методов МАИ и регрессии в единую автоматизированную систему «Shoescom» позволяет создать новые возможности для управления качеством в обувной промышленности.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024660266. Цифровое предприятие «Shoescom» / Голубева О.А., Доний А.С., Шевцов К.А., и др. Заявка №2024619327. Дата поступления 22 апреля 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 3 мая 2024 г.
3. Женина Е.С., Юдин С.В. Оценка качества изделий по данным контроля в производстве и в эксплуатирующих организациях // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. №2. С. 431 - 435.
4. Давлетов И.И. Управление качеством продукции машиностроительных предприятий // Московский экономический журнал. 2021. №7. С. 487 - 495.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Перевод с английского Р.Г. Вачнадзе. М. «Радио и связь». 1993. 278 с.
6. Фарисов Р.Д., Иоффе М.А., Козловский В.Н. Инструменты качества в массовом производстве чугунного литья // Известия Самарского научного центра РАН. 2022. №4 (108). С. 29 - 36.
7. Малышева Т.В., Лысенков А.И. Развитие системы управления качеством на основе предиктивной аналитики предупреждения рисков несоответствия продукции // Известия Самарского научного центра РАН. 2024. №2 (118). С. 56 - 65.
8. Стародубцева Е.Д. Современные подходы к применению концепции «Качество 4.0» на предприятиях // Петербургский экономический журнал. 2020. №4. С. 39 - 48.
9. Голубева О.А., Тищенко Я.Н., Белик В.В. Внедрение инструментов качества в обувное производство // Научный журнал. 2019. №10 (44). С. 14 - 15.

Голубева Олеся Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, 1354565@mail.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет,

Димитров Валерий Петрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kaf-qm@donsnu.ru, Россия, г. Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет,

Швецов Кирилл Андреевич, аспирант, Россия, Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет,

Доний Алина Сергеевна, магистрант, apgrlva@yandex.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет

MULTICRITERIA ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SHOE PRODUCTION BASED ON AN AUTOMATED SYSTEM MULTICRITERIA ANALYSIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SHOE PRODUCTION BASED ON AN AUTOMATED SYSTEM

O.A. Golubeva, V.P. Dimitrov, A.S. Doniy, K.A. Shvetsov

The article discusses the possibilities of using the hierarchy analysis method (HAM) and regression analysis in the automated system "Shoescom" for multi-criteria quality assessment of technological processes of shoe production. The use of the HAM method allows ranking quality indicators and identifying the most significant ones. Regression analysis helps

to identify quantitative relationships between process parameters and product quality indicators. Based on the analysis of the results, the "Shoescom" system formulates specific recommendations for improving the process, which confirms the high accuracy and validity of the proposed solutions.

Key words: quality management, quality control, defect analysis, footwear production, automated system.

Golubeva Olesya Anatolievna, candidate of technical sciences, docent, 1354565@mail.ru, Russia, Rostov-on-Don, Don State Technical University,

Dimitrov Valery Petrovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, kaf-qm@donsnu.ru, Russia, Rostov-on-Don, Don State Technical University,

Shvetsov Kirill Andreevich, postgraduate, Russia, Rostov-on-Don, Don State Technical University,

Doniy Alina Sergeevna, master's, apgrlva@yandex.ru, Russia, g. Rostov-on-Don, Don State Technical University

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-107-108

СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

А.Ю. Албагачиев, В.А. Пухальский, И.М. Сидоров

В статье рассмотрена система качества, учитывающая весь жизненный цикл существования продукции. Предложены обобщённые структурные модели всех возможных вариантов объектов обеспечения качества. Данные модели являются основой для разработки локальных классификаций объектов обеспечения качества, используемых при оценке качества продукции. Структурная модель системы качества учитывает варианты существования продукции на рынке, как приросте её потребления, так и при сокращении потребления.

Ключевые слова: качество продукции, человеческое общество, жизненный цикл продукции, обобщённая структурная модель, иерархическая часть модели, схема взаимодействия объектов обеспечения качества.

Прежде, чем предложить читателю сам подход, считаем необходимым разъяснить свою точку зрения на ряд вопросов понятийного характера.

Во-первых, что такое качество продукции? Дискуссии на эту тему, и в том числе периодически возникающие на страницах журнала «Стандарты и качество», до настоящего времени не привели к единому мнению. Если взять его таким, как оно принято в работе [1], в значительной степени коррелирующим с определением по ГОСТ 15467-79, то главным условием высокого качества продукции является максимум удовлетворения потребностей человеческого общества, но при условии минимума ущерба для него от существования данной продукции на протяжении всего её жизненного цикла.

Тогда, во-вторых, что такое человеческое общество, фактически выступающее как потребитель продукции? А точнее, согласно [2], какие процессы его существования, а, следовательно, и какие средства обеспечения этих процессов, следует рассматривать, как определяющие качество продукции.

Ответ на этот вопрос является крайне важным, но и чрезвычайно трудным делом. Конечно, в полной мере дать исчерпывающий ответ мы не берёмся, но расставить приоритеты между возникающими потребностями считаем сделать, возможно. Основой такого анализа может служить иерархическая классификация потребностей Абрахама Маслоу. Перечень потребностей, используемый в этой классификации, позволяет особо чётко увидеть свойство эмерджентности, работающее в человеческом обществе как системе. Если рассмотреть эти потребности, учитывая ограниченность ресурсов, то есть с точки зрения «бережливого» существования отдельного человека и общества, то увидим следующее. Для существования отдельного человека достаточно удовлетворения самых насущных – первичных потребностей. На этом уровне человек часто и останавливается, не стремясь развиваться дальше. Для существования общества, напротив, требуется, чтобы эффективность его отдельного члена была как можно выше. А, следовательно, для общества необходимо, чтобы отдельный человек добивался выполнения как можно более высоких вторичных потребностей – вплоть до потребности самовыражения.

И в-третьих, о каком жизненном цикле продукции [3] идёт речь? Очевидно, что для как можно более полной оценки особенностей продукции, необходимо учитывать все стадии её существования: разработку, изготовление эксплуатацию и утилизацию.

А теперь изложим предлагаемый подход к обеспечению качества продукции.

Итак, работая в области промышленного производства, мы нацелены на две взаимосвязанные между собой задачи. Это: либо задачу выбора конструкции, например, станка, режущего инструмента и так далее для конкретных условий процесса производства, либо задачу выбора областей рационального использования конкретной конструкции, то есть рациональных условий процесса производства. Как видно из рассмотренного примера и более подробно рассмотрено в работе [1], все возможные варианты объектов обеспечения качества представляют два альтернативных, но существующих только совместно класса. Это процессы и конструкции.

Следовательно, нам необходимо знать закономерности, связывающие между собой параметры процесса и его конструкционного обеспечения с качеством использования их человеком. То есть найти некую формулу – принцип, на котором строится огромное многообразие окружающего нас мира.

Необходимо отметить, что решение таких задач естественно требует системного подхода. При этом степень обобщения зависит от объёма знаний в данной области исследования. Здесь также необходимо сказать, что речь может идти об исследовании только закрытых систем, потому что, представляя, как устроен исследуемый объ-

ект, то есть, создавая его модель, мы фактически ограничиваем (закрываем) систему. Следовательно, полученные нами закономерности могут быть справедливы лишь с учётом принимаемых для данной модели ограничений.

Для обеспечения при анализе объектов обеспечения качества такого подхода разработаны их обобщенные модели. С этой целью были проанализированы работы многих авторов, посвященные классификации самых разных объектов природы. При анализе необходимо было добиться максимально возможной степени обобщения. Из рассмотренных было выбрано несколько структур-прототипов, пригодных для разработки обобщенных структур процесса и конструкции. Затем, путём анализа этих структур и определения аналогий в их построении в пространстве и времени со свойствами реальных объектов, создавалась обобщённая структурная модель объекта обеспечения качества.

Полученная таким образом обобщенная структура конструкции представлена на рис. 1. На каждом из уровней её иерархии предусматривается количественный и качественный подуровни. На качественном подуровне конструкция делится на основание, промежуточную и рабочую части, на количественном подуровне каждая из этих частей может состоять как из одного, так и из нескольких элементов. Вспомогательные части конструкции обеспечивают взаимодействие основных частей конструкции. Они имеют свою – особую структуру, представленную на рис. 1 в виде тройных связей, обозначающих процессы предварительного ориентирования, базирования и закрепления.



Рис. 1. Обобщённая структурная модель конструкции [1]

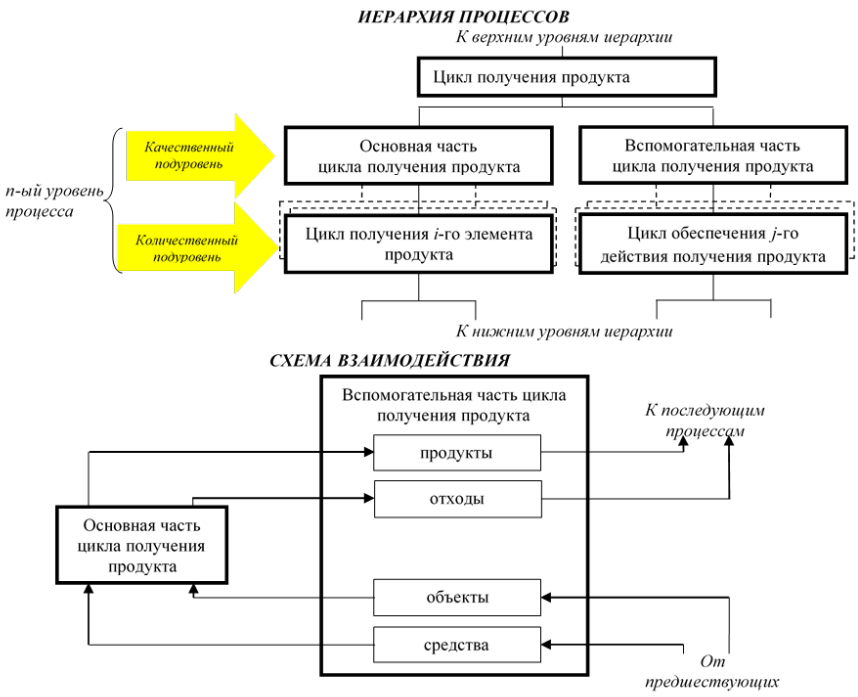


Рис. 2. Обобщённая структурная модель процесса [1]

Обобщенная структура процесса, показанная на рис. 2, по аналогии со структурой конструкции, предусматривает деление процесса на основной и вспомогательный циклы получения продукта, а также наличие в его иерархической структуре различных уровней. Каждый уровень процесса состоит из качественного и количественного подуровней. Взаимодействие процессов также как конструкций происходит на качественных подуровнях.

Сами же схемы взаимодействия у процессов и конструкций существенно отличаются.

Как видим полученные структуры процессов и конструкций имеют пространственное строение.

Вертикальное – иерархическое строение структур служит хорошей основой для разработки локальных классификаций, что способствует более определённому целеполаганию при оценке. Эта часть структур позволяет определиться с уровнем, на котором следует рассматривать объект обеспечения качества.

Схемы взаимодействия, отражающие строение по горизонтали, фактически служат средством для анализа условий оценки эффективности объектов обеспечения качества. Схема взаимодействия процессов объясняет, как движутся (действуют) конструкции в течение цикла преобразования объекта в продукт. Схема же взаимодействия конструкций объясняет, как сохраняется целостность конструкции.

Особо следует отметить, что модель, представленная на рис. 2, описывает процессы, которые могут быть осуществлены естественным образом. Для этого, согласно схемы взаимодействия процессов, необходимо, чтобы в нужное время в нужном месте и в нужном количестве появились объекты и средства преобразования. А затем для завершения процесса необходимо, чтобы было время и место, куда уйдут продукты и отходы этого процесса.

Устроенные таким образом процессы и их конструкционное обеспечение обозначим как «элементарные», существование которых, как уже было отмечено выше, может происходить естественным образом. Однако без участия человека эти процессы не имеют цели. А тогда вообще сложно понять, например, кто или что является объектом, а что средством на входе процесса и что отнести к продукту, а что будет отходами на выходе процесса.

Для обеспечения же повторного протекания интересующего человека процесса он вынужден организовывать ещё целый ряд других процессов для производства и доставки на вход данного процесса объектов и средств преобразования и отвода из зоны протекания этого процесса продуктов для передачи их последующим процессам, а также отвода отходов для их утилизации. То есть человек организовывает определённую многоуровневую сеть процессов, которая должна обеспечить жизненный цикл необходимой для существования человека продукции. Совершенно очевидно, что именно эта сеть процессов и составляет организационно-техническую суть системы качества этой продукции.

Следовательно, в отличие от объектов обеспечения качества, системы качества являются искусственным образованием. Поэтому для определения их структурной модели потребовалось рассмотрение опыта по созданию таких систем человеком.

В результате подробного анализа строения систем качества по различным источникам [1] была определена структурная модель системы качества в наибольшей степени, отражающая реально происходящие в ней процессы (рис. 3). Предлагаемая структура системы состоит из: витков качества продукции, представляющих жизненные циклы продукции соответствующих уровней, направлений развития и узлов управления витками. Наличие последних заслуживает особого внимания, так как в известных на сегодня системах они отсутствуют.

Отсутствие узлов управления витками не позволяет должным образом согласовать работу между отдельными стадиями жизненного цикла продукции и отдельными предприятиями (организациями), на уровне которых сегодня разрабатываются системы качества.

В узлах осуществляется управление работами по совершенствованию качества продукции, как на отдельном витке её качества, так и при развитии системы и переходе к следующему витку спирали качества продукции. В зависимости от потребности в конкретной продукции для человеческого общества, совершенствование системы качества осуществляется как путём увеличения количества производимой продукции, так и изменения свойств отдельных единиц продукции. То есть, при определении направления развития системы качества продукции необходимо расставлять приоритеты между количественным и качественным преобразованиями этой продукции.

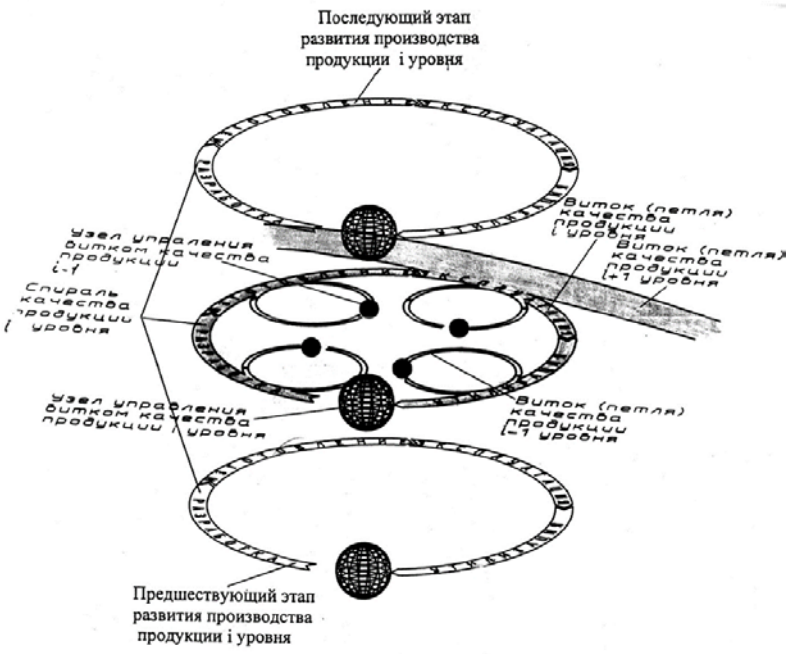


Рис. 3. Структурная модель системы качества [1]

Существующие в настоящее время представления о расстановке приоритетов можно описать следующим образом.

Приоритет количественного развития системы – это стремление к массовому (может быть даже в ущерб качеству отдельных единиц продукции) производству. Приоритет качественного развития – наоборот, предусматривает улучшение качества единицы продукции при ограниченном количестве последней. Собственно это парадигма «бережливого» производства [4]. При сокращении потребления продукции вплоть до нуля, а это уже парадигма «живучего» производства [4], осуществляется переход к производству другой продукции.

Здесь важно отметить, что полезный эффект от продукции человек получает лишь на стадии её эксплуатации, а в только что рассмотренных вариантах развития происходит переключение внимания на стадию производства (изготовления) продукции. В работе [5], напротив, решается задача получения паспортных характеристик, которые в рамках ГОСТ 2.601-2006 должны определять эффективное использование продукции на стадии эксплуатации.

Однако не учёт жизненного цикла объекта обеспечения качества в целом [2] может привести к ошибочному решению по развитию системы качества.

Поэтому планировать развитие системы человеческому обществу необходимо исходя из степени удовлетворения этой продукцией своих потребностей с учётом затрат на протяжении всего её жизненного цикла.

Определение же того, насколько количественно продукция *i*-го уровня соответствует потребности в ней, происходит на стадии эксплуатации этой продукции, но при её использовании в жизненном цикле (витке качества) продукции *i*+1-го уровня (см. рис. 3).

Настоящее исследование было проведено в связи с доведением РТУ МИРЭА Государственного задания № 075-00701-24-07 от 03.04.2024г. и заключением дополнительного соглашения к Соглашению о предоставлении субсидий из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственных заданий по обеспечению государственных услуг (выполнения работ) от 05.04.2024г. №075-03-2024-077/8 по теме "Исследование методов пассивации воздействия в процессах технических обработок и эксплуатации" (шифр "Наука").

Список литературы

1. Пухальский В.А. Ресурсосберегающая система обеспечения качества продукции. М.: Изд. дом «Спектр», 2016. 432 с.

2. Пухальский В.А. Потребитель – это кто, что…? // Стандарты и качество. 2023 №8. С. 108 – 109.

3. Пухальский В.А. Жизненный цикл продукции и его содержание. [Электронный ресурс] URL: http://www.ria-stk.ru/stq/adetail.php?ID=167659&sphrase_id=1897546 (дата обращения: 10.05.2024).

4. Адлер Ю.П. Менеджмент в меняющемся мире // Стандарты и качество. 2019. №8 с.

5. Албагачиев А.Ю., Пухальский В.А., Забельян Д.М. Универсальные паспортные характеристики продукции машиностроения. М.: Изд. дом «Спектр», 2024. 154 с.

Албагачиев Али Юсупович, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом, albagachiev@ya.ru, Россия, Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,

Пухальский Владимир Альфредович, канд. техн. наук, puhalya@mail.ru, Россия, Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,

Сидоров Иван Михайлович, канд. техн. наук, начальник отдела, ivan.sidorov0120@yandex.ru, Россия, Москва, МИРЭА - Российский технологический университет

A STRUCTURAL APPROACH TO ENSURING PRODUCT QUALITY

A.Yu. Albagachiev, V.A. Pukhalsky, I.M. Sidorov

The article considers a quality system that takes into account the entire life cycle of the product. Generalized structural models of all possible variants of quality assurance facilities are proposed. These models are the basis for the development of local classifications of quality assurance facilities used in product quality assessment. The structural model of the quality system takes into account the variations of the existence of products on the market, both with an increase in their consumption and with a reduction in consumption.

Key words: product quality, human society, product life cycle, generalized structural model, hierarchical part of the model, scheme of interaction of quality assurance objects.

Albagachiev Ali Yusupovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, albagachiev@ya.ru, Russia, Moscow, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,

Pukhal'skiy Vladimir Alfredovich, candidate of technical sciences, puhalya@mail.ru, Russia, Moscow, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,

Sidorov Ivan Mikhailovich, candidate of technical sciences, ivan.sidorov0120@yandex.ru, Russia, Moscow, MIREA - Russian University of Technology

УДК 621.91.01
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-111-112

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПАСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

А.Ю Албагачиев, М.Н. Ерофеев, В.А. Пухальский, И.М. Сидоров

Рассмотрен вопрос разработки цифрового двойника машиностроительной продукции, отражающего её паспортные характеристики. Основные потребительские свойства продукции представлены на примере режущего инструмента.

Ключевые слова: машиностроительная продукция, паспортные характеристики, цифровой двойник, режущий инструмент, параметры оценки.

С 1 июля 2024г в России вступил в силу закон о стимулировании спроса на отечественную промышленную продукцию. Документ определяет ряд понятий, в том числе «производитель российской промышленной продукции», «реестр российской промышленной продукции». Закон также предусматривает создание системы цифровых паспортов промышленной продукции. Как ранее рассказали ТАСС в Минпромторге, «речь идет о формировании единого механизма идентификации товаров и аккумулировании данных о мерах поддержки производителей и заказчиков».

Цифровой двойник [1–3, 5–10] позволяет по входным данным оборудования предсказать ключевым параметры объекта. При помощи технологии цифровых двойников возможно решать различные типы задач диагностики состояния объекта, оптимизации работы, предсказания.

В работе [1] отмечено, что основой паспорта режущего инструмента являются факторы, отражающие его техническое совершенство.

«Техническое совершенство» согласно [2] по определению тождественно «показателю эффективности использования продукции» по ГОСТ 15467-79. Согласно определению – это количественная характеристика степени достижения полезных результатов при использовании продукции в конкретной эксплуатационной ситуации с учётом эксплуатационных затрат.

Полученное в [1] комплексное поле номограмм преобразовывается в паспортные характеристики продукции после определения практических закономерностей между используемыми в ней параметрами.

Выбор зависимостей, точнее «вида кривых», отражающих взаимовлияние параметров в номограмме паспорта осуществим по координатам априори известных, по сути их реперных точек.

Здесь, предвидя большое количество вопросов и даже возражений, следует особо отметить следующее. Наиболее нам известными и принимаемыми без доказательств точками зависимостей являются именно те, опыты в которых никогда не проводились и не будут проведены. Это точки с значениями параметров ноль и бесконечность.

На рис. 1 представлен вид гипотетической зависимости, получаемой в I – ом квадранте. Как видим, нам известны координаты точек *1* и *3*. О точке *2* известно только то, что она имеет некоторую координату «x» по оси $T_{\text{от}}$ и некоторую координату «y» по оси Q. Такая зависимость описывается следующей формулой [3]:

$$Q = aT_{om}{}^{b}e^{cT_{om}} \tag{1}$$

При условиях: $c < 0$ и $0 < b < 1$.

Значения a, b, c определяются после проведения испытаний и аппроксимации экспериментальных данных по формуле (1).

Аналогично получается зависимость в IV-ом квадранте. Она будет описываться формулой:

$$A = a_1T_{om}{}^{b_1}e^{c_1T_{om}} \tag{2}$$

Значения a_1, b_1, c_1 определяются после проведения испытаний и аппроксимации экспериментальных данных по формуле (2).

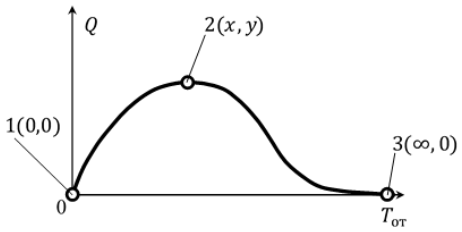


Рис. 1. Реперные точки зависимости в I – ом квадранте:Q – объем снимаемого обрабатываемого материала за время $T_{\text{от}}$; $T_{\text{от}}$ – время работы инструмента до и между отказами

Во II – ом квадранте необходимо представить вид получаемой гипотетической зависимости между Q и Q/q. Учитывая то, что квадранты I и II связаны геометрически, можно предположить, что кривая, описывающая искомую зависимость, будет иметь вид, показанный на рис. 2. Как видим, априори нам известны координаты точек *1* и *3* (начальная и конечная точки графика), остальные лежат в поле графика.

Эта зависимость описывается следующей формулой («Декартов лист») [3]:

$$(\frac{Q}{q})^3 + Q^3 = 3a\frac{Q^2}{q}\ . \tag{3}$$

Зависимость в III-ем квадранте получается путём переноса соответствующих координат точек, полученных во II-ом и IV-ом квадрантах.

Этот комплекс номограмм позволит иметь представление как об отдельных свойствах режущего инструмента (квадранты I, II, IV), так и о показателе его технического совершенства, наиболее комплексной характеристике инструмента, получаемой на основе анализа его эффективности в III-ем квадранте.

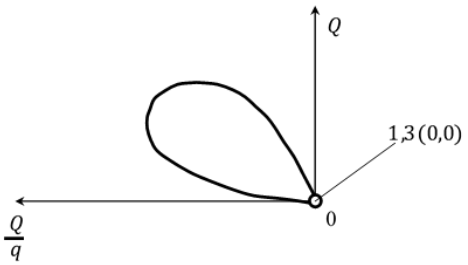


Рис. 2. Реперные точки зависимости во II – ом квадранте: q – расход режущего инструмента за время $T_{от}$

Критерием завершения испытания в отдельном опыте является поломка инструмента.

Серия экспериментов осуществляется на отдельном луче производительности. Это становится возможным в связи со следующим.

Объём срезаемого за время наработки на отказ припуска равен:

$$Q = T_{от}VSt \tag{4}$$

где: V – скорость, S – подача, t – глубина резания.

Тогда, производительность обработки равна:

$$П = \frac{Q}{T_{от}} = VSt \tag{5}$$

Практически этот набор параметров определяется возможностями металлорежущего станка и инструмента, которые определяют сектор лучей задаваемых производительностей.

Серия экспериментов считается законченной лишь тогда, когда получено максимально возможное значение целевого параметра Q и дальнейшее варьирование входными параметрами эксплуатации не приводит к его увеличению. Данный опыт является заключительным опытом этой серии. Полученные значения параметра Q и соответствующее ему значение $T_{от}$ являются координатами экспериментальной точки, расположенной на границе области возможного использования режущего инструмента в первом квадранте.

Следовательно, показатель технического совершенства определяется с использованием областей возможного использования режущего инструмента. Определение границ областей возможного использования режущего инструмента осуществляется по результатам его испытаний в лабораторных условиях.

Количество серий экспериментов (количество лучей и конкретных значений производительностей) выбирается исходя из необходимого для построения (аппроксимации экспериментальных точек уравнением кривой) линии границы возможного использования режущего инструмента в первом квадранте.

Для каждого проведенного опыта фиксируются данные о том, при каких значениях параметров условий эксплуатации режущего инструмента: V, S, t и так далее, какие значения выходных параметров ($T_{от}$,Q, A, q и т.д.) получаются. Варьирование параметрами эксплуатации от опыта к опыту осуществляется в широком диапазоне при всевозможных сочетаниях их значений, но при условии, что производительность остается постоянной.

Линии границ возможного использования определяются путём аппроксимации выбранными выше зависимостями значений мод распределений, получаемых в условиях заключительных опытов каждой серии.

Далее следует отметить, что отдельные участки получаемых границ областей возможного использования, имеют как различные величины их доверительных интервалов, так и различные законы распределений получаемых значений. Данное положение представлено применительно к I-ому квадранту на рис. 3. Как видим, имеются три такие зоны.

I – ая зона имеет наибольший разброс получаемых результатов ($Q, T_{от}$) и частость появления конкретных случаев подчиняется экспоненциальному закону распределения.

II – ая зона имеет несколько меньший разброс получаемых результатов ($Q, T_{от}$) и частость появления конкретных случаев подчиняется закону распределения Вейбула.

III – ая зона имеет наименьший разброс получаемых результатов ($Q, T_{от}$) и частость появления конкретных случаев подчиняется нормальному закону распределения.

В связи с этим величина доверительных интервалов на различных участках границы возможного использования режущего инструмента не одинакова.

Кроме этого необходимо рассмотреть ещё одну важную особенность получаемых распределений. Доверительные интервалы распределений на рис. 3 представлены по лучам различной производительности. То есть их величины не могут быть измерены ни в единицах Q ни в единицах ($T_{от}$). Поэтому для получения возможности сравнительной оценки нами было введено понятие комплексной переменной. Её величина зависит и от Q и от $T_{от}$, она равна:

$$K = \sqrt{Q^2 + {T_{от}}^2}.$$

На рис. 4 наглядно показано, как влияет расположение (а именно угол наклона) луча производительности на величины разброса Q и $T_{от}$ и их соотношения. Этот факт говорит о чисто геометрическом преимуществе вариантов работы инструмента с малыми производительностями, с точки зрения надёжности получения определённого значения целевого параметра.

Далее следует отметить, что работа до поломки не может считаться экономичной. Поэтому в паспорте необходимо задавать условия, не допускающие поломки. Этой цели служат линии рационального использования инструмента.

Определение координат точек, расположенных на линии рационального использования продукции, осуществляется следующим образом.

Сначала в первом квадранте значение $T_{от}$, полученное на конкретном луче производительности, для экспериментальной точки, расположенной на границе области возможного использования, уменьшается на величину,

гарантирующую не наступление предельного состояния, то есть поломки режущего инструмента. Затем, исходя из величины производительности на данном луче, для уменьшенного значения $T_{от}$ вычисляется значение Q. Затем определяется уравнение, описывающее линию рационального использования режущего инструмента в первом квадранте.

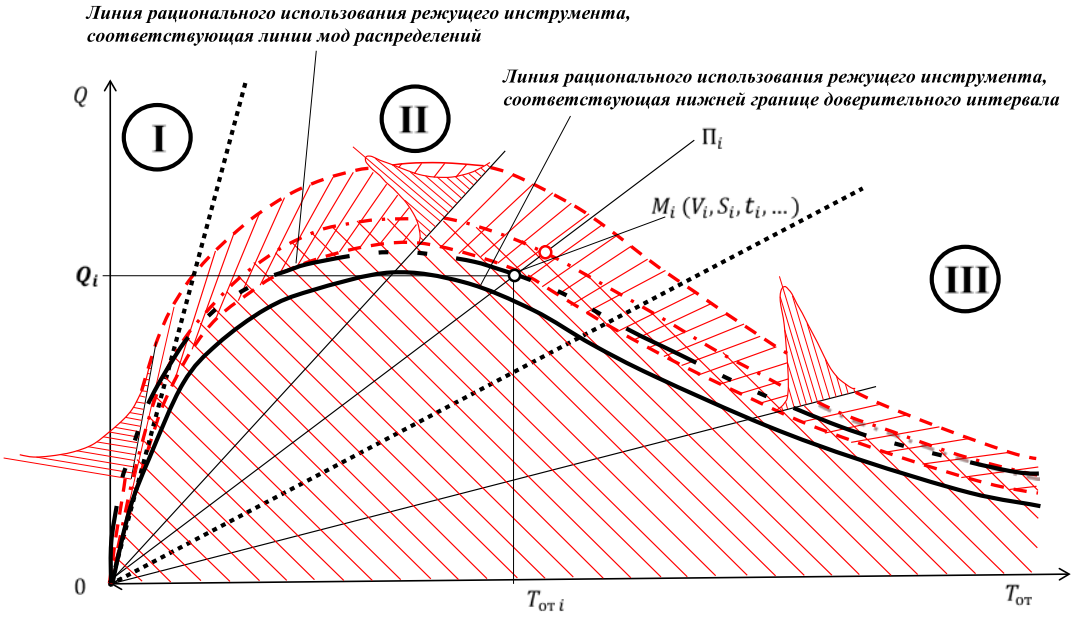


Рис. 3. Область возможного использования и линия рационального использования режущего инструмента с учетом вероятностного характера полученных экспериментальных данных: V_i, S_i, t_i, … – параметры режимов и условий резания, соответствующие точке M_i; I, II, III – зоны высокой, средней и низкой производительности соответственно

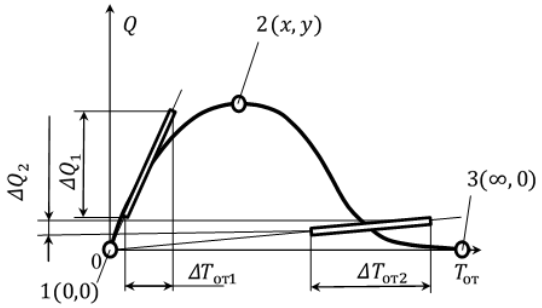


Рис. 4. Влияние луча производительности на величину разброса Q и $T_{от}$ при условии одинаковой величины доверительного интервала

В четвертом квадранте построение линии рационального использования режущего инструмента осуществляется аналогичным образом. Разница заключается в том, что в данном квадранте в отличие от первого рассматриваются лучи постоянных мощностей. Причем максимальное значение работы – A, совершенной за соответствующее время наработки продукции до отказа – $T_{от}$, получено при тех же условиях эксплуатации (V, S, t и т.д.), при которых за это время получено максимальное Q в первом квадранте.

Во втором квадранте построение линии рационального использования режущего инструмента осуществляется по следующим правилам. Для тех же условий эксплуатации (V, S, t и т.д.), которые определены для точек линии рационального использования в первом квадранте, берутся те же значения Q. Значение выходного параметра q, полученное при определении границ возможного использования, с доведением режущего инструмента до поломки, должно быть скорректировано. Коррекция осуществляется в сторону уменьшения расхода инструмента за время – $T_{от}$, исходя из того, что период наработки на отказ для точки, лежащей на линии рационального использования меньше, чем для точки, лежащей на границе области возможного использования. Это априори гарантирует эксплуатацию режущего инструмента с отказами, приводящими лишь к нарушению его работоспособного состояния, позволяющего его ремонт и восстановление.

В третьем квадранте построение линии рационального использования осуществляется путем проецирования соответствующих точек из второго и четвертого квадрантов.

По области, ограниченной линией рационального использования в III-ем квадранте (см. рис. 5), осуществляется оценка технического совершенства инструмента.

Показатель технического совершенства режущего инструмента определяется по следующей формуле:

$$\Im_{TC} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 0{,}5\theta R(\theta) d\theta \qquad (6)$$

где $R = \sqrt{\left(\frac{Q}{q}\right)^2}$ – величина радиуса отвечает за размер области, который в свою очередь говорит об универсальности продукции; $argtg\frac{Q}{qNT} = \theta = \theta$ – этот угол является, как бы весомостью, придаваемой радиусу и говорящей об эффективности работы на этом радиусе.

Соответственно, показатель технического совершенства режущего инструмента будет тем лучше, чем будет больше его величина.

Для потребителя в паспорте инструмента даются характеристики и визуализируются номограммы, соответствующие линиям рационального использования инструмента. В случае задания нулевой величины доверительного интервала линии рационального использования будут соответствовать линиям мод распределений.

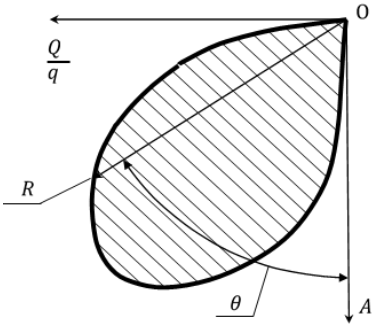


Рис. 5. Область, ограниченная линией рационального использования инструмента, получаемая в III-ем квадранте

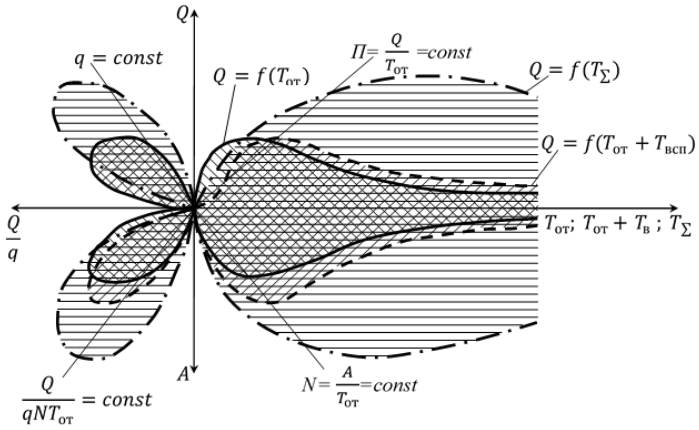


Рис. 6. Области рационального использования режущего инструмента: $T_{от}$ – время работы инструмента до и между отказами; $T_{в}$ – время восстановления режущих свойств инструмента; T_{Σ} – временной ресурс работы инструмента; Q – объем снимаемого обрабатываемого материала за время $T_{от}$; A – работа, совершаемая инструментом за время $T_{от}$;; q – расход режущего инструмента за время $T_{отm}$; П – производительность резания; N – мощность резания

Необходимо сказать, что круг интересов тех, кто эксплуатирует режущий инструмент, конечно, не ограничивается периодом работы инструмента до и между отказами. Эксплуатационников также интересуют затраты на восстановление режущих свойств инструмента и величина его ресурса. На рис. 6 показаны варианты получения областей рационального использования: с учетом работы режущего инструмента до и между отказами (область, ограниченная сплошной линией), с учетом затрат на однократное восстановление режущих свойств инструмента (область, ограниченная пунктирной линией) и с рассмотрением работы инструмента и затрат на весь ресурс его работы (область, ограниченная штрихпунктирной линией).

Настоящее исследование было проведено в связи с доведением РТУ МИРЭА Государственного задания № 075-00701-24-07 от 03.04.2024г. и заключением дополнительного соглашения к Соглашению о предоставлении субсидий из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственных заданий по обеспечению государственных услуг (выполнения работ) от 05.04.2024г. №075-03-2024-077/8 по теме "Исследование методов пассивации воздействия в процессах технических обработок и эксплуатации" (шифр "Наука").

Список литературы

1. Албагачиев А.Ю., Пухальский В.А., Забельян Д.М. Комплексная оценка потребительских свойств машиностроительной продукции // Вестник машиностроения. 2024. №6. С. 525 – 528.

2. Пухальский В.А. Оценка качества и жизненный цикл продукции // Стандарты и качество. 2019. №9. С. 100 – 104.

3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1967. 608 с.

4. Как цифровые двойники помогают российской промышленности. [Электронный ресурс] URL: https://rb.ru/longread/digital-twin (дата обращения: 07.05.2022).

5. Создание и внедрение цифровых двойников. [Электронный ресурс] URL: https://www.anylogic.ru/features/digital-twin (дата обращения: 08.05.2022).

6. Azure Digital Twins. [Электронный ресурс] URL: https://azure.microsoft.com/ru-ru/services/digital-twins/#security (дата обращения: 18.05.2022).

7. Bao Q. Ontology-based modeling of part digital twin oriented to assembly // Proceedings of theInstitution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2020. P. 1 – 13.122

8. Barricelli B.R., Casiraghi E., Fogli D. Department of Information Engineering, Università degli Studi di Brescia, Brescia, Italy A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications // IEEE Access. 2019. (Vol. 7) P. 167653 – 167671.

10. Qi Q. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 3585 – 3593.

Албагачиев Али Юсупович, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом, albagachiev@ya.ru, Россия, Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,

Ерофеев Михаил Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе, erofeevmn@imash.ru, Россия, Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,

Пухальский Владимир Альфредович, канд. техн. наук, puhalya@mail.ru, Россия, Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,

Сидоров Иван Михайлович, канд. техн. наук, начальник отдела, ivan.sidorov0120@yandex.ru, Россия, Москва, МИРЭА - Российский технологический университет

DIGITAL DOUBLE OF THE PASSPORT CHARACTERISTICS OF ENGINEERING PRODUCTS

A.Yu. Albagachiev, M.N. Yerofeev, V.A. Pukhalsky, I.M. Sidorov

The issue of developing a digital twin of machine-building products reflecting its passport characteristics is considered. The main consumer properties of the products are presented on the example of a cutting tool.

Key words: machine-building products, passport characteristics, digital double, cutting tool, evaluation parameters.

Albagachiev Ali Yusupovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, albagachiev@ya.ru, Russia, Moscow, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences.

Erofeev Mikhail Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, deputy. director of scientific work, erofeevmn@imash.ru, Russia, Moscow, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,

Pukhal'skiy Vladimir Alfredovich, candidate of technical sciences, puhalya@mail.ru, Russia, Moscow, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,

Sidorov Ivan Mikhailovich, candidate of technical sciences, head of department, ivan.sidorov0120@yandex.ru, Russia, Moscow, MIREA - Russian University of Technolog

УДК 004.413
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-115-116

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ И ЦИФРОВИЗАЦИИ В АВТОСБОРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

И.А. Беляева

В работе представлены результаты анализа наиболее актуальных проблем обеспечения эффективной информатизации и цифровизации в условиях автосборочного производства. Предложены направления улучшения рассматриваемых процессов.

Ключевые слова: конкурентоспособность; качество; автосборочное производство; информатизация; цифровизация.

Проблема ускорения разработки и внедрения инструментов информатизации и цифровизации в процессе проектирования новых автомобилей также как и все выделенные ранее обладает свойство системности [1, 2]. С одной стороны (рисунок 1) мы видим что своевременное создание и внедрение инструментов цифрового моделирования продукции в текущую практику проектирования автомобилей, значительно повышает качество протекания рассматриваемого процесса [3, 4]. С другой стороны трудно признать что достигнутые, на наших предприятиях, в настоящее время темпы разработки соответствующего программного обеспечения достаточны для формирования продукта имеющего самые высокие показатели конкурентоспособности [5, 6]. Решение обозначенной проблемы находится в плоскости интенсификации процессов разработки необходимых программных комплексов и информа-

ционных систем решающих в том числе коммуникативные функции и обеспечивающие связь между командами разработчиков в условиях запараллеливания процесса разработки конструкции и отдельных узлов, компонентов и деталей [7]. Решение задач связанных с повышением эффективности процесса проектирования за счет внедрения современных инструментов информатизации и цифровизации также обеспечивает улучшение в решении задач технологической подготовки производства, обеспечения соответствия при организации сборки новой продукции (рисунок 1).



Рис. 1. Графическая интерпретация вопроса обеспечения развития инструментов информатизации, цифровизации и моделирования при создании новых конструкций автомобилей



Рис. 2. Развитие инструментов управления качеством в проектах при создании информационной базы дефектов

В настоящее время, на этапах проектирования начинают активно внедрять инструменты предупреждающие возможные риски дефектов перспективных конструкций автомобилей [8, 9]. Логика рассуждений при создании такого рода информационных инструментов достаточно простая. Значительная часть комплектующих изделий уста-

навливаемых на новые модели автомобилей переходит с устоявшегося модельного ряда, который стабильно выпускает автосборочное предприятие [10]. Сегодня доля оригинальных комплектующих изделий в конструкциях новых моделей автомобилей варьируется от 20 до 40%, а это означает, что в процессе проектирования прогнозировать эксплуатационную дефектность продукции по комплектующим на уровне 60 – 80%, что довольно существенно как для корпоративных служб инжиниринга предприятий, так и соответствующих аналитических подразделений службы качества [11, 12].

Текущую ситуацию и концепцию развития инструментов управления качеством с учетом создания электронной базы дефектов иллюстрирует рисунок 2.

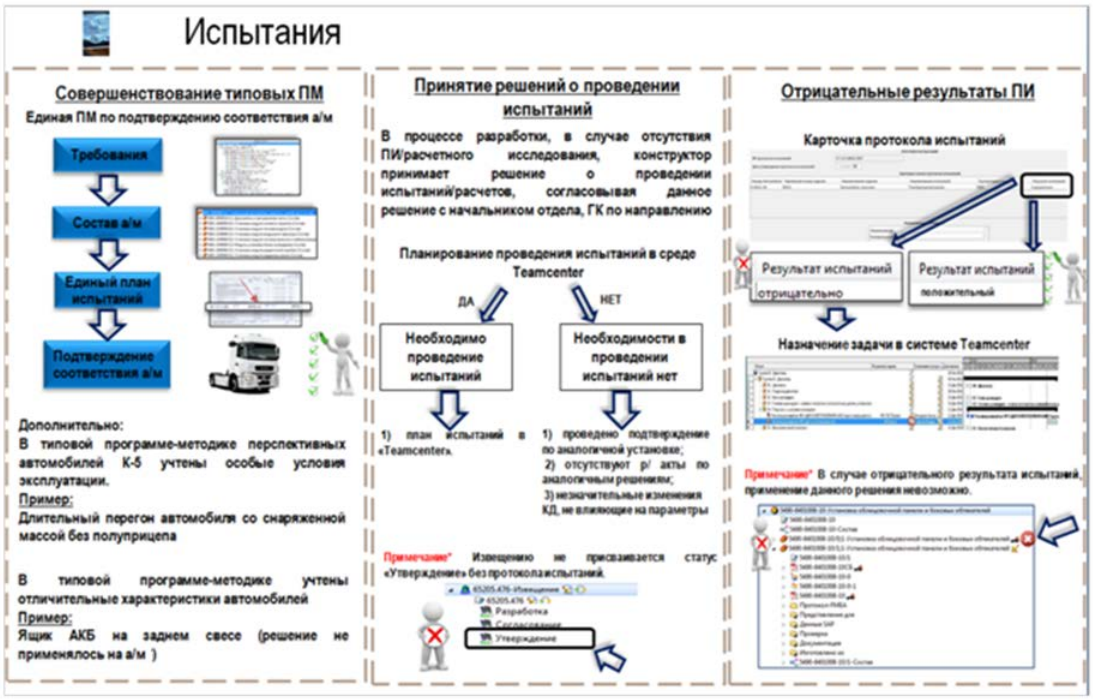


Рис. 3. Применение цифровых инструментов при испытаниях перспективной продукции



Рис. 4. Совершенствование процессов моделирования технологии производства при проектировании новых автомобилей

Следующим актуальным направлением совершенствования инструментов расчета и моделирования в проектах является применение современных цифровых средств для проведения валидации и верификации продукции в процессе испытаний [13, 14]. Как показывает международный опыт, в настоящее время виртуальный инстру-

ментарий проведения испытаний новых конструкций автомобилей активно развивается, интеграция его в процесс проектирования обеспечивает повышение эффективности этапов разработки [15, 16], а также повышает качество и результативность процесса (рисунок 3).

Применение современных программных средств на этапах проектирования новых автомобилей для совершенствования технологии становится актуальной задачей для автомобильной промышленности [17, 18]. В орбиту комплексных решений направленных на улучшение подготовки проектов для безболезненного переноса конструкций в серийное или массовое производство требуются комплексные решения охватывающие практически все этапы проектирования (рисунок 4).

Перспективное решение задачи направленной на обеспечение качества проектов в автомобилестроении, для традиционных отечественных автопроизводителей, в настоящее время заключается в насыщении этапов проектирования цифровыми инструментами и их активное освоение [19, 20].

Принятие управленческих решений о внедрении новых конструкций, в данном случае возможно на основе реализации человеко-машинной системы, пока что без участия технологий искусственного интеллекта [21]. Сейчас для нас актуально применение современных программных средств поддержки с реализацией экспертных методов оценки результатов расчетного моделирования и выработкой соответствующего положительного или отрицательного решения по конструкции. Далее по мере накопления опыта возможно создание электронных базы знаний по соответствующим этапам проектов, когда с учетом инструментов машинного обучения, можно будет переходить к интеллектуальной поддержке проектов (рисунок 5).



Рис. 5. Графическая интерпретация инструментов принятия решений о внедрении конструкции, реализуемая с помощью информационных и цифровых инструментов поддержки

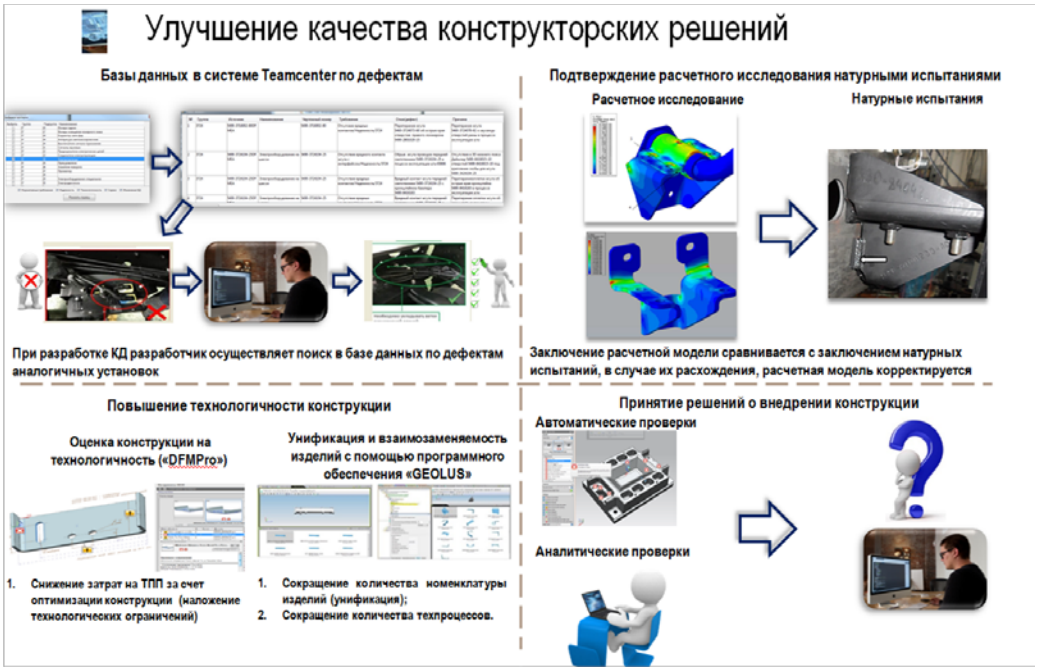


Рис. 6. Наиболее актуальные направления совершенствования этапов проектирования с точки зрения насыщения инструментами информатизации и цифровизации

Таким образом совершенствование инструментов информатизации и цифровизации в процессе проектирования автомобилей необходимо усиливать с точки зрения создания электронных баз данных по дефектам для ограничений возможных конструкторских решений, несущих риски в области качества, а также внедрения инструментов подтверждения расчетного исследования натурным испытаниям, улучшения технологичности и принятия решений о внедрении конструкции (рисунок 6).

Список литературы

1. Козловский В.Н. Методология анализа и прогнозирования качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, А.В. Заятров // Актуальные проблемы экономики. 2016. Т. 186. № 12. С. 387-398.

2. Козловский, В.Н. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1 / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 1. С. 40-49.

3. Козловский В.Н. Проблема стратегического планирования улучшения качества и надежности системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, А.В. Заятров // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 1. С. 44-47.

4. Panyukov D. Development and research FMEA expert team model / D. Panyukov, V. Kozlovsky, Y. Klochkov // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. 2020. Т. 27. № 5. С. 2040015.

5. Инновационные механизмы управления потенциалом сферы сервиса в регионе / Л.И. Ерохина, О.Н. Наумова, Л.С. Любохинец, В.П. Лещишена, О.В. Любохинец, Г.М. Кулапина, О.В. Маркова, Н.В. Никитина, И.А. Калашникова, В.Н. Дудко, Е.В. Мещерякова, В.Н. Козловский, С.Н. Цветкова, Т.В. Кретинина, Е.А. Бреусова, С.В. Фатеева, С.Н. Новоселов, Н.М. Ульяницкая, М.М. Шаблыкин, Г.А. Буряков и др. // Тольятти, 2013.

6. Дебелов В.В. Моделирование электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости / В.В. Дебелов, В.В. Иванов, В.Н. Козловский, В.И. Строганов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 6. С. 2-7.

7. Козловский В.Н. Концепция методологии комплексной программы улучшений / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.В. Айдаров, Д.И. Панюков, Р.Д. Фарисов // Стандарты и качество. 2022. № 7. С. 36-42.

8. Строганов В.И. Математическое моделирование основных процессов электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин, Л.Х. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 7. С. 129-132.

9. Панюков Д.И. Новое руководство по FMEA: структурный анализ процессов / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2020. № 10. С. 36-42.

10. Козловский В.Н. Моделирование электронной системы VVT управления двигателем легкового автомобиля / В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 4. С. 5-12.

11. Козловский В.Н. Стратегическое планирование конкурентоспособности с точки зрения качества / В.Н. Козловский, С.А. Шанин, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2017. № 3. С. 76-80.

12. Дебелов В.В. Электронная система управления автомобиля "START-STOP" / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 2. С. 6-9.

13. Kozlovskiy V. System of customer satisfaction monitoring by new cars in view of perceived quality / V. Kozlovskiy, D. Aydarov // Quality - Access to Success. 2017. Т. 18. № 161. С. 54-58.

14. Панюков Д.И. Формирование эффективной FMEA-команды / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, С.А. Шанин // Стандарты и качество. 2017. № 7. С. 68-72.

15. Kozlovsky, V.N. Calculation and statistical experiment on the monte carlo method when assessing the stability of the technical characteristics of the automobile generator set in mass production / V.N. Kozlovsky, V.E. Lysov, V.V. Ermakov, D.V. Antipov, D.F. Skripnuk // В сборнике: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. 2019. С. 565-568.

16. Николаев П.А. Многофакторная оценка влияния дорожной обстановки на помехоустойчивость бортового электротехнического комплекса автомобилей / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорний, А.С. Саксонов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 1. С. 36-41.

17. Козловский В.Н. Математическая имитационная модель оценки зарядного баланса автомобиля / В.Н. Козловский, У.В. Брачунова, А.В. Крицкий, А.С. Саксонов // Грузовик. 2021. № 7. С. 17-26.

18. Николаев П.А. Оценка соответствия автомобилей требованиям помехоустойчивости к внешним электромагнитным воздействиям / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорний // Грузовик. 2017. № 10. С. 44-48.

19. Козловский В.Н. Мониторинг удовлетворенности потребителей качеством автомобилей / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2016. № 6. С. 100-105.

20. Козловский В.Н. Цифровизация и проблемы трудовых коллективов: роли и ответственность / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.И. Панюков, Р.Р. Гафаров // Стандарты и качество. 2022. № 1. С. 94-98.

21. Панюков Д.И. Моделирование процедуры FMEA: анализ рисков / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 9. С. 34-43.

Беляева Ирина Александровна, канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник, belyaeva-ommr@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

TOPICAL ISSUES OF ENSURING INFORMATIZATION AND DIGITALIZATION IN AUTOMOTIVE ASSEMBLY PRODUCTION

I.A. Belyaeva

The paper presents the results of the analysis of the most urgent problems of ensuring effective informatization and digitalization in the conditions of automobile assembly production. Directions for improving the processes under consideration are proposed.

Key words: competitiveness, quality, automobile assembly production, informatization, digitalization.

Belyaeva Irina Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent, belyaeva-ommr@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 004.413
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-120-121

ПЛАН УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

И.А. Беляева, В.Н. Козловский, А.С. Подгорний, А.В. Гусев

В работе представлены результаты разработки инструментария создания плана управления качеством при проектировании машиностроительной продукции.
Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, машиностроение, план управления.

Связь между основными документами управления проектом проектирования новой продукции представлена графически на рисунке 1. Как видно, формирование карты потока процесса проектирования и соответствующего пакета документов проекта перспективной продукции должно начинаться с определения ключевых характеристик и далее формируются пакеты конструкторской документации, FMEA конструкции и процесса закладываемые в план управления и далее формируются рабочие инструкции [1, 2]. На первых этапах организации проекта необходимо разработать инструментарий оценки и мониторинга качества прохождения этапов процесса проектирования [3 – 5]. Это требование является обязательным и с точки зрения стандартов менеджмента качества и с точки зрения требований наиболее полного обеспечения потребностей потребителей (рисунок 1).



Рис. 1. Графическая интерпретация связей плана управления проектами и другими документами

Как видно, одно из центральных мест в системе документов по проекту занимает план управления, который интегрирует в себя описание системы управления продуктом и процессов на основе полученного ранее опыта [6].

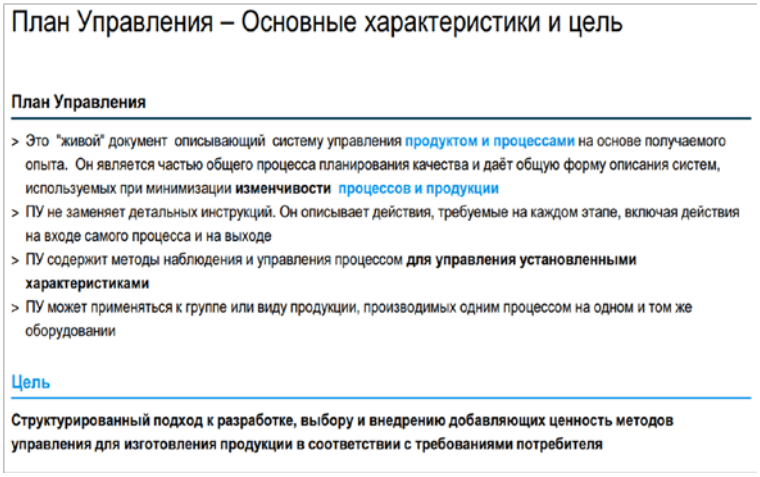


Рис. 2. Основные характеристики и цель плана управления в проектах

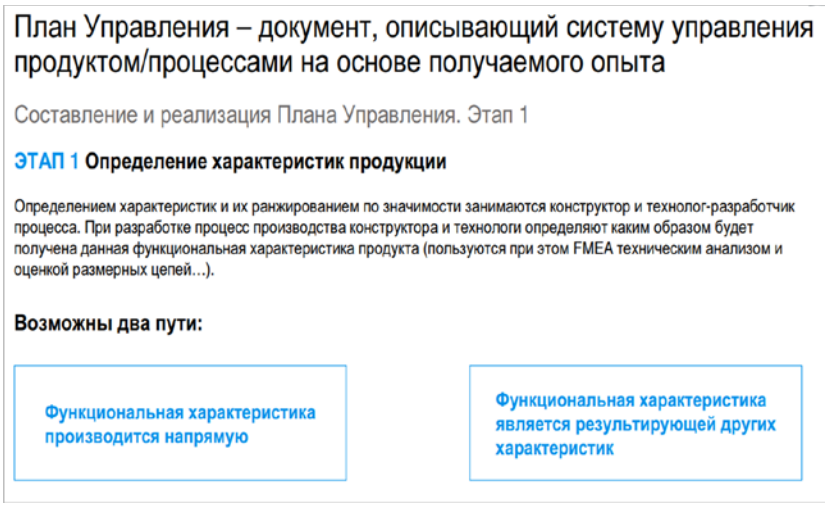
По сути, выше нами рассмотрены этапы формирования соответствующего опыта управления проектами с учетом проблемных точек.

Выделим основные аспекты и отличительные особенности планов управления, которые характеризуют именно проектную деятельность. Основные характеристики и цель плана управления кратко изложены на рисунке 2. Классификация планов управления реализуемых в процессах проектирования новой продукции может быть представлена в виде данных рисунка 3.



Рис. 3. Классификация планов управления

В виде графических иллюстраций на рисунке 4 кратко представлены целевые установки этапов создания плана управления проектом, а на рисунке 5 предложены основы функционирования плана управления с учетом функциональных обязанностей подразделений и кратким описанием собственно функционала [7, 8].

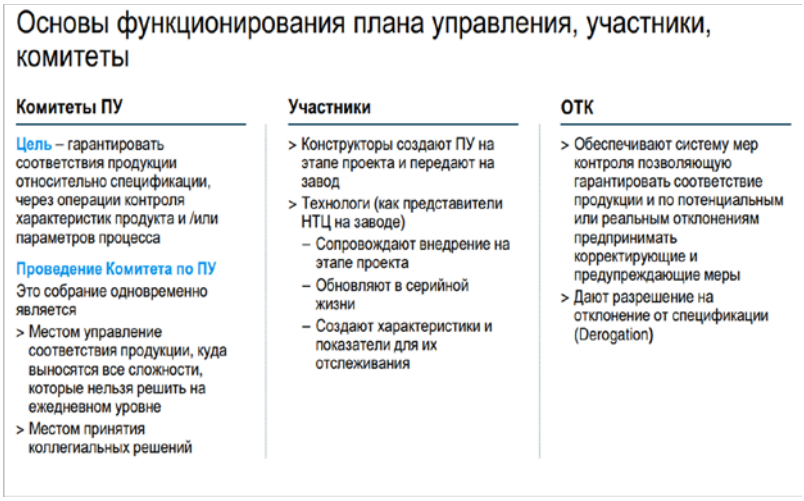


а

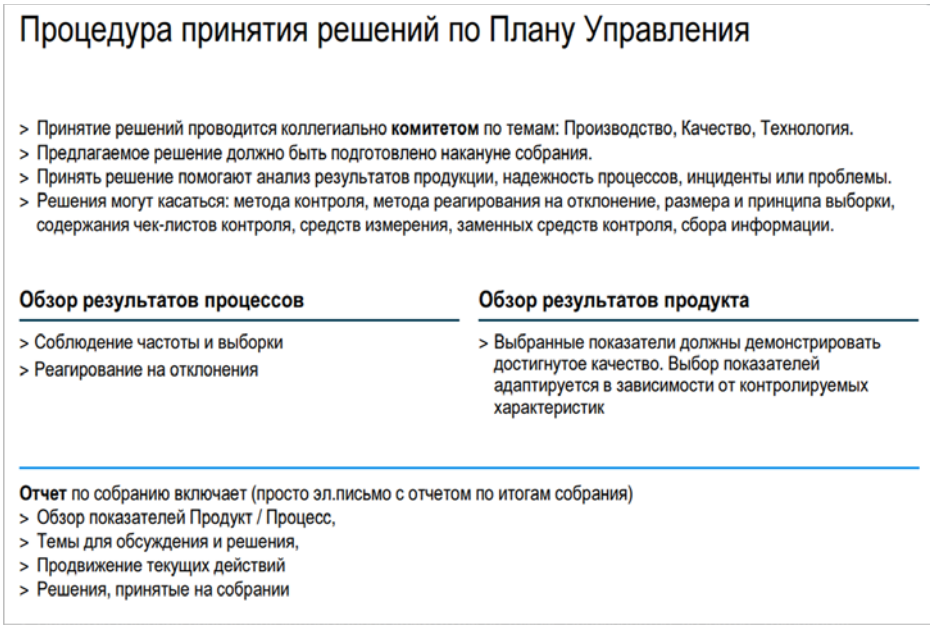


б

Рис. 4. Этапы составления и реализации плана управления в проектах



а



б

Рис. 5. Основы функционирования плана управления в проектах (а), а также процедура принятия решений по плану управления (б)

Ключевые проблемы мешающие развитию системных инструментов управления в проектировании к сожалению не меняются [9, 10], все они обобщены в рамках рисунка 6.

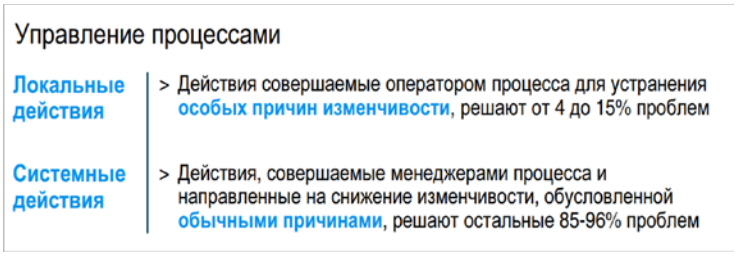


Рис. 6. Ключевые проблемы мешающие эффективному внедрению плана управления в проектах

Глобально текущая ситуация требует перехода решения проблемных вопросов качества с уже изготовленной продукцией на обеспечение управления будущим качеством потока продукции, а для этого необходимо решать в том числе и перспективные задачи напрямую связанные с развитием информатизации и цифровизации в проектах (рисунок 7).



а



б

Рис. 7. Цели и средства управления в проектах

В качестве примера, на рисунке 8 представлен разработанный в электронном виде, на этапе проектирования, план управления автомобилей в производстве [11, 12].



Обновлено:		Выполнять							Наблюдать									Решать	Реагировать	
Цех	Участок / Бригада	Объект контроля	Продукт	Процесс	Автомобили / шасси			Характеристика	КР	Контрольно-измерительное оборудование	Средства замены	Гарантия качества измерений (Эталонирование)	Технологическая документация	Раб. Инструкция	Размер выборки	Частота контроля	Кто выполняет	Запись результатов	Средство принятия решения	Блок-схема реагирования	Журнал реагирования
М	ЦКиСА	Контроль регулировки углов схождения колес	Продукт					Угол схождения колес	КР	стенд регулировки FORI P0811	-	В соответствии с рекомендациями службы метрологии (минимум 1 раз в год)	SM PAR 100	SWXXXMPAR10	3 Автомобиля/проект	1/день	Ст.оператор	бумажный бланк для записи	бланк контроля / SIMAP	SWXXXMPAR11	ЖЖМ
М	ЦКиСА	Контроль регулировки фар	Продукт					Угол наклона пучка света фар	КР	Luminoscope FORI P0811	-	DAM «N° NT/65850/020/06»	SM PHA 100	VXXXMPHA	3 Автомобиля/проект	1/день	Ст.оператор	бумажный бланк для записи	бланк контроля / SIMAP	SWXXXMPHA11	ЖЖМ
М	ЦКиСА	Зазоры КПП	Продукт					Зазоры в КПП		Щуп	-	В соответствии с рекомендациями службы метрологии (минимум 1 раз в год)	SM JPL 200	SWX90MJPL10 SWX79MJPV10	3 автомобиля	1/день	Ст.оператор	бумажный бланк для записи	бланк контроля / SIMAP	SWX90MJPL11 SWX79MJPV11	ЖЖМ
М	ЦКиСА	Контроль выхлопных газов	Продукт					Соответствие выхлопных газов	КР	газоанализатор ULTIMA 6000	-	В соответствии с рекомендациями службы метрологии (минимум 1 раз в год)	FOP S Specifie RUSSIE S.M. EGE 100	SWXXXMGAZ10	3 Автомобиля/тип	6/ mois	Ст.оператор	бумажный бланк для записи	бланк контроля	SWXXXMGAZ11	ЖЖМ
М	ЦКиСА	Количество проблесков поворотников	Продукт					Количество проблесков поворотников	КР	секундомер, визуально	-	В соответствии с рекомендациями службы метрологии (минимум 1 раз в год)	FOP S Specifie RUSSIE	SWXXXMCLG10	3 Автомобиля	1/день	Ст.оператор	бумажный бланк для записи	бланк контроля / SIMAP	SWXXXMCLG11	ЖЖМ
М	ЦКиСА	Люфт руля	Продукт					Угол люфта (отклонения) руля	КР	Прибор измерения люфта колес ИСЛ-401М	-	selon les préconisations du service métrologie (minimum : 1 pas / an)	FOP S Specifie RUSSIE	SWXXXMJVL10	3 Автомобиля	1/ смена	Ст.оператор	бумажный бланк для записи	бланк контроля / SIMAP	SWXXXMJVL11	ЖЖМ

Рис. 8. Пример реализации плана управления в производстве автомобильной техники

Инструменты аудита и мониторинга состояния проектов. Для организации эффективной работы в проектах и решения задачи создания современного инструментария управления качеством процесса проектирования новых конструкций автомобильной техники необходимо создать системный инструмент, который обеспечивает возможность для мониторинга состояния основных этапов процесса проектирования, который так сказать помогает проводить комплексный компетентный аудит и инвентаризацию подходов в сложившейся системе. В качестве такого ин-

струмента предлагается рассматривать лист аудита (чек-лист) процесса (рисунок 9), графическую структуру процесса проектирования с детализацией ключевых функций с выделением центров ответственности и исполнителей, которая представлена на рисунке 9.

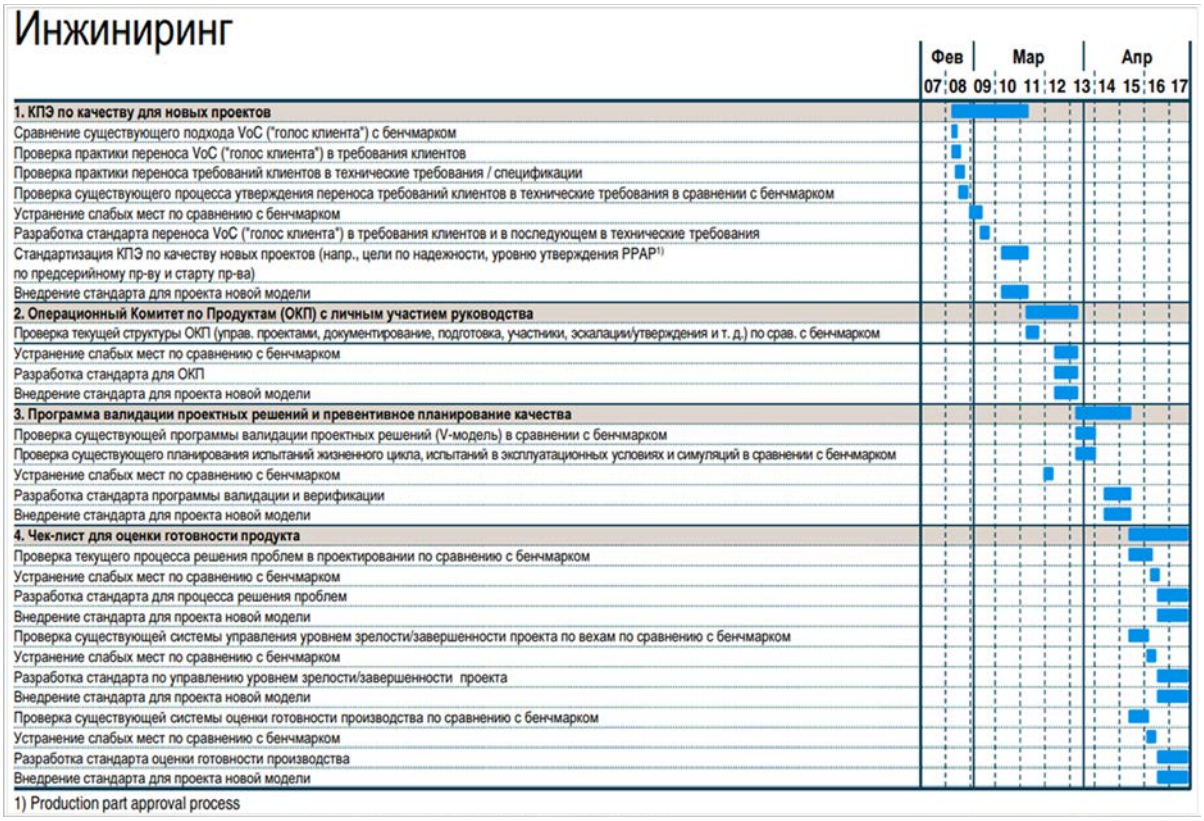
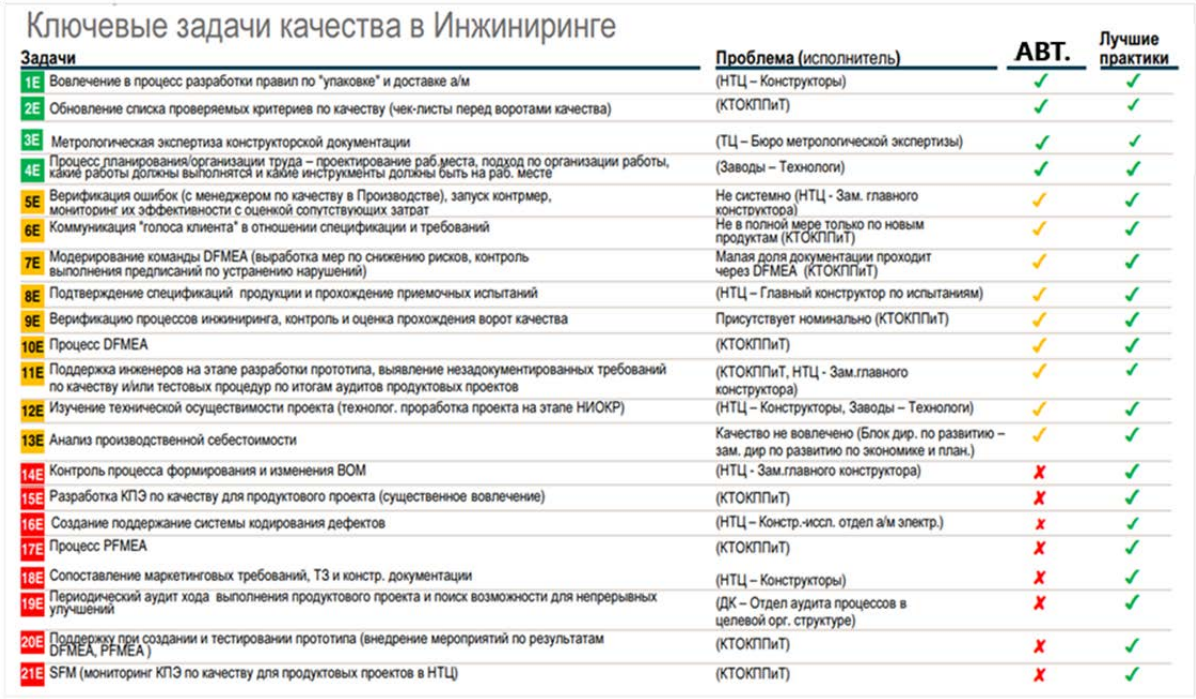


Рис. 9. Чек-лист аудита проектов



Рис. 10. Визуализация схемы процесса проектирования новых автомобилей с выделением основных функций, центров ответственности и исполнителей

В продолжении рассматриваемого вопроса, для обеспечения информативности и идентификации всех основных задач в области обеспечения качества процесса проектирования новых автомобилей, представим области работы выделенные на рисунке 11 в виде матрицы распределения задач по ответственным подразделениям с перекрестным указанием оценки исполнения соответствующих задач на предприятиях отечественного автопрома (АВТ.) и оценки лучших практик (рисунок 11).



Ключевые задачи качества в Инжиниринге

Задачи	Проблема (исполнитель)	АВТ.	Лучшие практики
1E Вовлечение в процесс разработки правил по "упаковке" и доставке а/м	(НТЦ – Конструкторы)	✓	✓
2E Обновление списка проверяемых критериев по качеству (чек-листы перед воротами качества)	(КТОКППиТ)	✓	✓
3E Метрологическая экспертиза конструкторской документации	(ТЦ – Бюро метрологической экспертизы)	✓	✓
4E Процесс планирования/организации труда – проектирование раб.места, подход по организации работы, какие работы должны выполнятся и какие инструкменты должны быть на раб. месте	(Заводы – Технологи)	✓	✓
5E Верификация ошибок (с менеджером по качеству в Производстве), запуск контрмер, мониторинг их эффективности с оценкой сопутствующих затрат	Не системно (НТЦ - Зам. главного конструктора)	✓	✓
6E Коммуникация "голоса клиента" в отношении спецификации и требований	Не в полной мере только по новым продуктам (КТОКППиТ)	✓	✓
7E Модерирование команды DFMEA (выработка мер по снижению рисков, контроль выполнения предписаний по устранению нарушений)	Малая доля документации проходит через DFMEA (КТОКППиТ)	✓	✓
8E Подтверждение спецификаций продукции и прохождение приемочных испытаний	(НТЦ – Главный конструктор по испытаниям)	✓	✓
9E Верификацию процессов инжиниринга, контроль и оценка прохождения ворот качества	Присутствует номинально (КТОКППиТ)	✓	✓
10E Процесс DFMEA	(КТОКППиТ)	✓	✓
11E Поддержка инженеров на этапе разработки прототипа, выявление незадокументированных требований по качеству и/или тестовых процедур по итогам аудитов продуктовых проектов	(КТОКППиТ, НТЦ - Зам.главного конструктора)	✓	✓
12E Изучение технической осуществимости проекта (технолог. проработка проекта на этапе НИОКР)	(НТЦ – Конструкторы, Заводы – Технологи)	✓	✓
13E Анализ производственной себестоимости	Качество не вовлечено (Блок дир. по развитию – зам. дир по развитию по экономике и план.)	✓	✓
14E Контроль процесса формирования и изменения BOM	(НТЦ - Зам.главного конструктора)	✗	✓
15E Разработка КПЭ по качеству для продуктового проекта (существенное вовлечение)	(КТОКППиТ)	✗	✓
16E Создание поддержание системы кодирования дефектов	(НТЦ – Констр.-иссл. отдел а/м электр.)	✗	✓
17E Процесс PFMEA	(КТОКППиТ)	✗	✓
18E Сопоставление маркетинговых требований, ТЗ и констр. документации	(НТЦ – Конструкторы)	✗	✓
19E Периодический аудит хода выполнения продуктового проекта и поиск возможности для непрерывных улучшений	(ДК – Отдел аудита процессов в целевой орг. структуре)	✗	✓
20E Поддержку при создании и тестировании прототипа (внедрение мероприятий по результатам DFMEA, PFMEA)	(КТОКППиТ)	✗	✓
21E SFM (мониторинг КПЭ по качеству для продуктовых проектов в НТЦ)	(КТОКППиТ)	✗	✓

Рис. 11. Матрица ключевых задач в инжиниринге с привязкой к центрам ответственности и перекрестным анализом оценки реализации на отечественных предприятиях и организациях обеспечивающих формирование лучших практик

Применение разработанной матрицы (рисунок 11) обеспечивает четкое понимание наличия и работы современных инструментов управления качеством в процессе проектирования на предприятиях отечественного автомобилестроения.

Список литературы

1. Козловский В.Н. Моделирование электронной системы VVT управления двигателем легкового автомобиля / В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 4. С. 5-12.

2. Козловский В.Н. Стратегическое планирование конкурентоспособности с точки зрения качества / В.Н. Козловский, С.А. Шанин, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2017. № 3. С. 76-80.

3. Дебелов В.В. Электронная система управления автомобиля "START-STOP" / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 2. С. 6-9.

4. Kozlovskiy V. System of customer satisfaction monitoring by new cars in view of perceived quality / V. Kozlovskiy, D. Aydarov // Quality - Access to Success. 2017. Т. 18. № 161. С. 54-58.

5. Панюков Д.И. Формирование эффективной FMEA-команды / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, С.А. Шанин // Стандарты и качество. 2017. № 7. С. 68-72.

6. Kozlovsky V.N. Calculation and statistical experiment on the monte carlo method when assessing the stability of the technical characteristics of the automobile generator set in mass production / V.N. Kozlovsky, V.E. Lysov, V.V. Ermakov, D.V. Antipov, D.F. Skripnuk // В сборнике: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. 2019. С. 565-568.

7. Николаев П.А. Многофакторная оценка влияния дорожной обстановки на помехоустойчивость бортового электротехнического комплекса автомобилей / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорний, А.С. Саксонов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 1. С. 36-41.

8. Козловский В.Н. Математическая имитационная модель оценки зарядного баланса автомобиля / В.Н. Козловский, У.В. Брачунова, А.В. Крицкий, А.С. Саксонов // Грузовик. 2021. № 7. С. 17-26.

9. Николаев П.А. Оценка соответствия автомобилей требованиям помехоустойчивости к внешним электромагнитным воздействиям / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорний // Грузовик. 2017. № 10. С. 44-48.

10. Козловский В.Н. Мониторинг удовлетворенности потребителей качеством автомобилей / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2016. № 6. С. 100-105.

11. Козловский В.Н. Цифровизация и проблемы трудовых коллективов: роли и ответственность / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.И. Панюков, Р.Р. Гафаров // Стандарты и качество. 2022. № 1. С. 94-98.

12. Панюков Д.И. Моделирование процедуры FMEA: анализ рисков / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 9. С. 34-43.

Беляева Ирина Александровна, канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник, toe_fp@samgtu.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Козловский Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Kozlovskiy-76@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Подгорний Александр Сергеевич, канд. техн. наук, научный сотрудник, zxcvbnm89207@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Гусев Алексей Викторович, аспирант, gusevav@aviacor.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

QUALITY MANAGEMENT PLAN IN DESIGNING ENGINEERING PRODUCTS

I.A. Belyaeva, V.N. Kozlovsky, A.S. Podgorny, A.V. Gusev

The paper presents the results of developing a toolkit for creating a quality management plan in designing engineering products.

Key words: competitiveness; quality; mechanical engineering; management plan.

Belyaeva Irina Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent, toe_fp@samgtu.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Kozlovsky Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, Kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Podgorny Alexander Sergeevich, candidate of technical sciences, senior researcher, zxcvbnm89207@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Gusev Alexey Viktorovich, postgraduate, gusevav@aviacor.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 004.413
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-126-127

МЕТОДОЛОГИЯ ПОИСКА И ОЦЕНКИ ПРЕДИКТИВНОЙ МОДЕЛИ ОБРАЩЕНИЙ В ПУНКТЫ ГАРАНТИЙНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

В. Г. Мосин

Рассмотрены методологические основы построения модели машинного обучения на временном ряде обращений в пункты гарантийного обслуживания автомобилей одного из крупнейших отечественных автопроизводителей. Особое внимание уделено методам оценки прогнозирующей способности, специфическим для временных рядов.

Ключевые слова: управление качеством, автомобилестроение, гарантийное обслуживание, анализ данных, временные ряды, машинное обучение, регрессия, pandas, numpy, skylearn.

Построение модели машинного обучения — это сложный и многогранный процесс, требующий тщательного планирования и структурированного подхода. Методология этого процесса не является окончательно отработанной и очевидной, требуются исследования различных типов моделей в различных предметных областях для того, чтобы из таких, вообще говоря, частных ситуаций со временем сформировался более или менее универсальный подход к моделированию [1, 2, 7 – 9].

В этой статье мы продемонстрируем эффективность методологического подхода к машинному обучению на примере регрессионной задачи, возникающей в процессе прогнозирования обращений в пункты гарантийного обслуживания автомобилей, хотя подобные (и даже эквивалентные) процессы возникают в различных сферах человеческой деятельности, и именно поэтому мы говорим о методологической ценности настоящего исследования: его результаты легко можно перенести на данные другой природы [3, 4, 10 – 12].

1.1. Теоретическая часть. В практических приложениях машинного обучения важную роль играют временные ряды, они возникают во многих областях, таких как финансы (цены акций, валютные курсы), экономика (ВВП, инфляция), здравоохранение (данные о распространении заболеваний), энергетика (потребление электроэнергии), транспорт (трафик, количество пассажиров) и многие другие [5]. Это делает их универсально применимым инструментом для анализа и прогнозирования [6, 13, 14]. Моделирование временных рядов позволяет извлекать полезную информацию из наблюдаемых данных, помогает понимать закономерности и тренды, а также делать прогнозы на будущее.

Однако, как будет показано ниже (см. пп. 4.3, 4.4), анализ временных рядов обладает своей спецификой, так как они могут содержать регулярные сезонные колебания, повторяющиеся через определённые интервалы времени, иметь или не иметь ряды долгосрочный тренд, который может быть линейным или нелинейным и т. д. Все эти особенности делают анализ и моделирование временных рядов интересной и сложной задачей, в которой применяются специализированные методы и алгоритмы машинного обучения и статистики (см. [6 – 8]).

1. 2. Постановки задачи

1.2.1. Предмет исследования. Предметом нашего исследования является пул моделей (см. п. 3) машинного обучения, который традиционно применяется к решению регрессионных задач, и методы их оценки [15, 16].

1.2.2. Методика исследования. Используя различные подходы к инжинирингу данных и различные методы оценки прогнозирующей способности регрессионных моделей (см. пп. 4, 5), мы сравниваем получающиеся результаты, что позволяет выбрать наиболее подходящий вариант моделирования временного ряда .

1.2.3. Цель исследования. Дать универсальный рецепт для построения идеальной модели невозможно, но можно сказать, как избежать ошибок. Наша цель — получение рекомендаций, которые предотвратили бы заведомые ошибки в регрессионном анализе временных рядов методами машинного обучения.

1.3. Технологии. Мы обрабатываем и анализируем данные, используя среду Jupyter Notebook. Эта среда предоставляет удобные возможности для работы на языке программирования Python и его основных библиотеках: NumPy, Pandas, Scikit-learn и Matplotlib (см. [1], [2]).

Библиотека NumPy является одним из ключевых инструментов для научных вычислений и обработки массивов данных в Python. Она предоставляет эффективные структуры данных, алгоритмы и функции для работы с одномерными и многомерными числовыми массивами.

Pandas — самая мощная библиотека для работы с данными в Python. Она плотно интегрируется с другими инструментами для анализа и обработки данных на платформе Python, такими как NumPy, Scikit-learn и Matplotlib. Pandas предоставляет эффективные методы обработки информации, а также множество алгоритмов и функций для анализа и визуализации данных (см. [1]).

Для решения регрессионных задач мы применяем библиотеку Scikit-learn, также известную как sklearn. Scikit-learn является мощным и гибким инструментом машинного обучения с широким спектром возможностей и удобным интерфейсом.

2. Описание данных. Данные предоставлены одним из ведущих отечественных автопроизводителей в результате еженедельной фиксации сведений по одному из дефектов в одном из пунктов гарантийного обслуживания. Данные содержат два признака:

date: дата окончания недели в формате yyyy-mm-dd;

target: целевая функция, в качестве которой выступает процент обращений с данным дефектом в данный пункт гарантийного обслуживания от всех обращений в этот пункт в течение указанной недели.

Применяя метод read_csv библиотеки pandas, читаем данные из файла, получаем датафрейм:

	date	Target
0	2022-10-01	1.0
1	2022-10-08	1.0
…	…	…
98	2024-08-17	4.4
99	2024-08-24	3.8

В нем 100 записей, даты описаны как string, целевая функция — как float, пропусков нет, визуализация временного ряда представлена ниже (см. рис. 1).

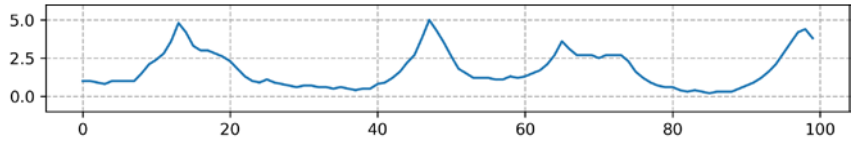


Рис. 1. Зависимость целевой функции от времени

Поскольку в нашем исследовании временная специфика признака date (дни недели, выходные/будние дни, сезон и т. д.) не играет никакой роли, для отображения на графике оси времени мы используем просто порядковые номера наблюдений: от 0 до 99.

3. Регрессионные модели. Есть множество методов построения регрессионной модели, начиная с классической линейной регрессии и заканчивая градиентным бустнгом на случайных лесах (см. [3], [4]). Мы формируем пул моделей из библиотеки sklearn:

1. LinearRegression: уже упомянутый выше инструмент для построения линейной регрессии, который оценивает взаимосвязь между независимыми переменными и зависимой переменной, минимизируя среднеквадратичную ошибку;
2. DecisionTreeRegressor: алгоритм машинного обучения для регрессии, который строит дерево решений, разделяя данные на участки, оптимально предсказывая значения целевой переменной в каждом листе дерева;
3. SVR: реализация метода опорных векторов для регрессии, которая позволяет спрогнозировать зависимые переменные, минимизируя количество ошибок с использованием гиперплоскостей в многомерном пространстве;
4. KNeighborsRegressor: алгоритм машинного обучения для решения регрессионных задач, который предсказывает значение целевой переменной путём усреднения значений k наиболее близких соседей в обучающей выборке;
5. MLPRegressor: многослойный перцептрон для решения задач регрессии, который обучается с использованием обратного распространения ошибки;
6. RandomForestRegressor: ансамблевый метод машинного обучения, который использует множество деревообразных регрессоров, обученных на различных подвыборках данных, чтобы предсказывать непрерывные значения за счёт усреднения результатов отдельных деревьев;
7. GradientBoostingRegressor: ансамблевый метод машинного обучения для решения задач регрессии, который строит предсказательную модель путем обучения последовательности более простых моделей (обычно деревьев решений), каждая из которых корректирует ошибки предыдущих.

Далее в ходе исследования мы будем в цикле прогонять через них наши данные и выбирать ту из моделей, которая покажет лучшие результаты с точки зрения прогнозирующей способности. Для этого, ещё до процедур препроцессинга и обучения, мы заводим список моделей model_list, по которым будем осуществлять цикл:

```
model_list = [
LinearRegression(),
        DecisionTreeRegressor(),
        SVR(),
        KNeighborsRegressor(),
        MLPRegressor(),
        RandomForestRegressor(),
        GradientBoostingRegressor()]
```

4. Моделирование на порядковых номерах. Поиск модели начнём с построения простейшей зависимости: будем искать целевую функцию как функцию от времени (точнее, в силу сделанных выше замечаний о природе предиктора, как функцию от порядкового номера наблюдений). Чтобы получить новый предиктор, добавляем в датафрейм с данными новый столбец, значения которого — это порядковые номера наблюдений с 0 по 99:

```
data['number'] = np.arange(len(data))
```

Затем формируем левую и правую части регрессионной задачи:

```
X = data[['number']]
y = data['target']
```

после чего можно приступать к моделированию и контролю моделей.

4.1. Train-test сплит. Разбиение данных на обучающую и тестовую выборки является наиболее распространённым методом контроля. Применим этот приём.

Для этого воспользуемся методом train_test_split из модуля model_selection библиотеки sklearn:

```
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2)
```

Теперь у нас есть обучающая выборка с левой частью X_train и правой частью y_train, содержащая 80 записей, на ней мы будем обучать наши модели. И есть тестовая выборка с левой частью X_test и правой частью y_test, содержащая 20 записей, на ней мы будем контролировать качество прогнозов, используя для этого коэффициент детерминации.

Далее мы реализуем цикл: при помощи метода fit библиотеки sklearn обучаем модель на тренировочных данных, при помощи метода predict той же библиотеки вычисляем прогноз на тестовых данных, получаем коэффициент детерминации и добавляем его в список оценок методом append:

```
for item in model_list:
   model = item
   model.fit(X_train, y_train)
   y_pred = model.predict(X_test)
   score = r2_score(y_pred, y_test)
   score_list.append(score)
```

Результаты представлены ниже:

Model	score
LinearRegression	-15956.9120
DecisionTreeRegressor	0.8294
SVR	-41.5853
KNeighborsRegressor	0.7580
MLPRegressor	-4072.1970
RandomForestRegressor	0.8998
GradientBoostingRegressor	0.8403

Напомним, что коэффициент детерминации может принимать значения от минус бесконечности до единицы, и чем ближе он к единице, тем выше прогнозирующая способность модели. Нулевой значение коэффициента детерминации означает так называемое «ленивое предсказание» по среднему, когда прогнозируемое значение всегда константное и равно среднему значению наблюдаемых величин, а отрицательное говорит о том, что прогнозирующая способность модели ещё хуже.

С учётом сказанного, результат линейной модели LinearRegression чудовищен. Так же, как и результаты нейронной сети MLPRegressor и регрессора на опорных векторах SVR. Остальные регрессоры показали вполне достойные результаты, лучший среди них — случайный лес RandomForestRegressor, и, казалось бы, поиск модели на этом можно завершать. Однако, не будем торопить события. Впереди нас ждёт ещё много неожиданного.

4.2. Кросс-валидация. Ещё один распространённый метод контроля моделей — кросс-валидация. Этот приём состоит в том, что вся совокупность наблюдений разбивается на k фолдов, после чего проводится k проверок: один из фолдов назначается тестовой выборкой, а остальные k-1 выступают в качестве обучающей выборки. Каждый раз вычисляется оценка, а общий результат получается как их среднее значение.

Кросс-валидация реализована в модуле model_selection библиотеки sklearn в виде метода cross_val_score. Мы применяем этот метод в цикле ко всем нашим моделям:

```
for model in model_list:
scores = cross_val_score(model, X, y, cv=5, scoring='r2')
```

Параметры метода cross_val_score вполне очевидны: мы применяем кросс-валидацию к модели model с левой и правой частями регрессионной задачи X и y, используем 5 фолдов, а в качестве оценки берём коэффициент детерминации R^2. Результаты приведены ниже.

model	score
LinearRegression	-1.5896
DecisionTreeRegressor	-1.6528
SVR	-3.9562
KNeighborsRegressor	-2.2936
MLPRegressor	-2.2267
RandomForestRegressor	-1.8427
GradientBoostingRegressor	-1.5598

Вот и первая из обещанных выше неожиданностей: результаты моделей уже не разбросаны на расстоянии тысяч единиц, они примерно одинаковы.

Но гораздо интереснее то, что они все отрицательны. То есть, те из моделей, которые демонстрировали хорошие (и даже очень хорошие) результаты на train-test сплите, на кросс-валидации не просто опускаются несколько ниже (это было бы понятно в силу того, что теперь проводится 5 проверок, а не одна), они с треском проваливаются!

4.3. Комментарий к полученным результатам. Этот феномен объясняется тем, что train-test сплит и кросс-валидация используют разные стратегии для разбиения выборки на обучающую и тестовую части. Один из параметров метода train_test_split — это параметр shuffle, отвечающий за перемешивание объектов. По умолчанию shuffle=True, то есть, если это специально не оговорено, перемешивание выполняется (см. рис. 2, левую колонку). Кросс-валидация использует для разбиения метод kFolds, который вообще не указывается напрямую среди параметров метода cross_val_score, а вызывается параметром cv, причём, у метода kFolds по умолчанию перемешивание отключено: shuffle=False (см. рис. 2, правую колонку).

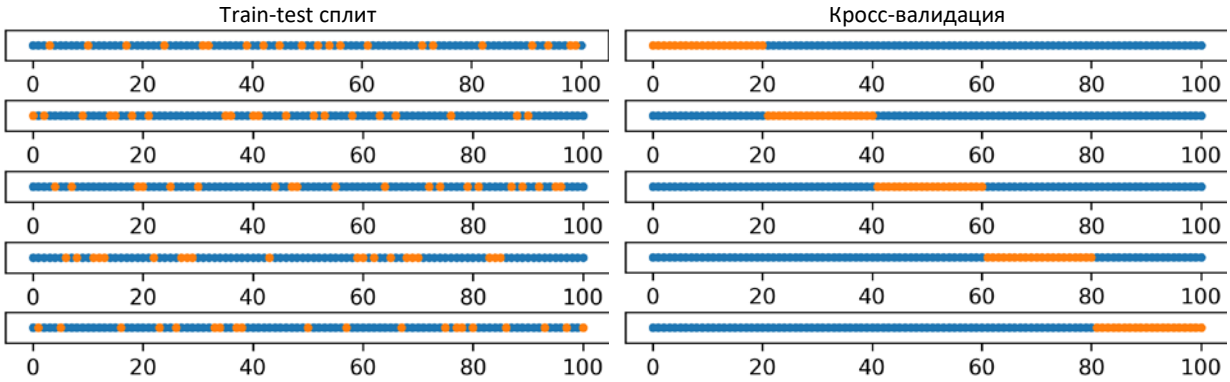


Рис. 2. Разбиение на обучающую (синие точки) и тестовую (жёлтые точки) выборки

В связи с том, что тестовая выборка при применении метода train_test_split примерно равномерно распределена внутри обучающей выборки, часть моделей хорошо справляется с прогнозом на тесте. И наоборот, для других моделей такое разбиение пагубно сказывается на прогнозирующей способности. При применении cross_val_score тестовая выборка всегда находится вне обучающей, на что все модели реагируют примерно одинаково: они ничего не могут предсказать.

Наша задача состоит не в том, чтобы подобрать хорошие оценки. Строго наоборот: нам нужно подобрать хорошую модель, которая будет давать разумный прогноз на этапе её реального использования. В каком-то смысле даже хорошо, что мы нашли такой метод проверки, который обнуляет наш первоначальный оптимизм, так как то, что представлялось нам отличным решением, на самом деле не является таковым.

4.4. Кросс-валидация временного ряда. И это ещё не последний удар по нашему оптимизму. Дело в том, что данные, с которыми мы работаем в рамках настоящего исследования, представляют из себя временной ряд. Это значит, что прогноз модели осуществляется только после того, как получены предыдущие значения целевой функции, другими словами — тестовая выборка всегда должна находиться правее обучающей (см. рис. 3, правую колонку).

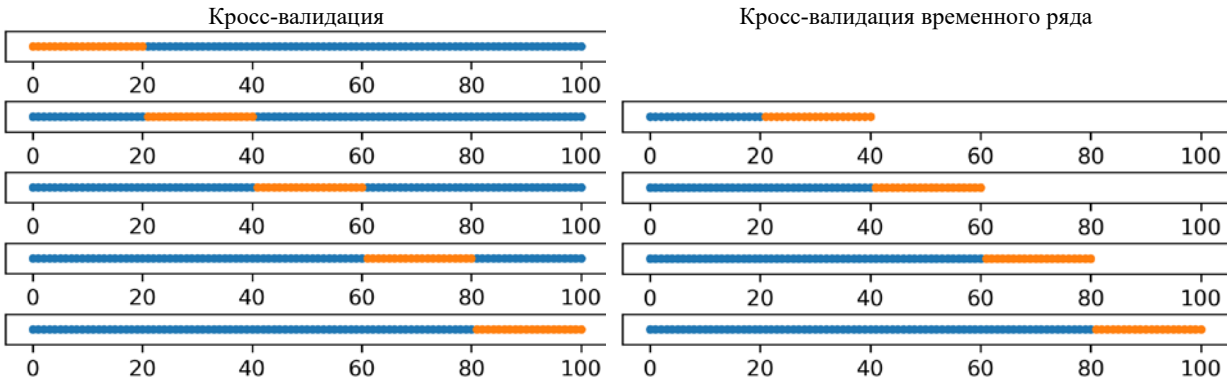


Рис. 3. Классическая кросс-валидация и кросс-валидация временного ряда

Это дополнительно ужесточает требования к модели: обучение должно происходить на левой части данных, а предсказание — на правой. В библиотеке sklearn такое разбиение реализуется методом TimeSeriesSplit из модуля model_selection.

Мы заводим объект кросс-валидации временного ряда tscv из класса TimeSeriesSplit, указав число фолдов, как и в предыдущем случае классической кросс-валидации равное пяти, чтобы сравнение результатов было корректным:

```
tscv = TimeSeriesSplit(n_splits=5)
```

После этого нам приходится строить вложенный цикл: внешний цикл берётся по всем моделям из пула регрессионных моделей, которые мы определили в самом начале исследования, а внутренний — по всем фолдам кросс-валидации временного ряда:

```
scores = []
for model in model_list:
    for train_index, test_index in tscv.split(X):
        X_train, X_test = X.iloc[train_index], X.iloc[test_index]
        y_train, y_test = y.iloc[train_index], y.iloc[test_index]
        model.fit(X_train, y_train)
        y_pred = model.predict(X_test)
        score = r2_score(y_test, y_pred)
        scores.append(score)
    print(model, np.mean(scores))
```

Результат приведён в таблице ниже:

model	score
LinearRegression	-17.0118
DecisionTreeRegressor	-10.0308
SVR	-7.3130
KNeighborsRegressor	-6.7633
MLPRegressor	-10.6504
RandomForestRegressor	-9.4655
GradientBoostingRegressor	-8.5491

Как и следовало ожидать, результат оказался ещё хуже, чем в случае с классической кросс-валидацией. Мы вынуждены констатировать, что наша попытка спрогнозировать целевую функцию по номерам наблюдений оказалась неудачной.

5. Авторегрессия. Попробуем изменить концепцию моделирования. Допустим, что наступил момент времени T_k, и нам нужно спрогнозировать целевую функцию в следующий момент времени T_{k+1}. Заметим, что в этот момент времени нам уже известны все предыдущие значения целевой функции: T_k, T_{k-1}, T_{k-2} и так далее, вплоть до T_0. Гипотеза, которая возникает после этого замечания, состоит в том, что возможно (не наверняка, но возможно) последующие значения целевой функции как-то зависят от предыдущих, и возможно (опять-таки, мы не утверждаем этого наверняка, мы делаем такое предположение), что они как-то через них выражаются. Если это так, то мы сможем получить модель, отталкиваясь не от времени наступления события, как мы делали это раньше, а от предыдущих событий. Этот приём в анализе временных рядов называется авторегрессией (см. [5]).

5.1. Автокорреляционный анализ. Применяя метод plot_acf из пакета statsmodels, строим коррелограмму автокорреляции нашего временного ряда (см. рис. 4).

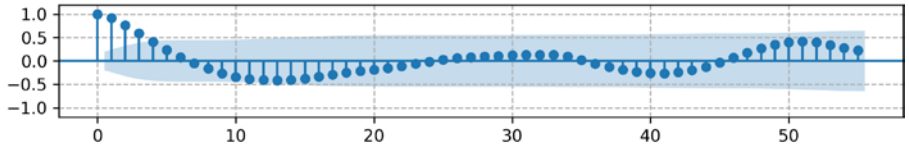


Рис. 4. Коррелограмма автокорреляции

Столбики на рисунке показывают значения автокорреляций для разных временных лагов, например, лаг 1 вычисляет корреляцию текущего значения с предыдущим, лаг 2 — с пред- предыдущим и так далее. Закрашенная область вокруг нуля по горизонтальной оси представляет собой доверительный интервал для автокорреляции (по умолчанию в методе plot_acf устанавливается уровень значимости 0.05). Если значение автокорреляции (столбик) находится внутри этой области, то оно статистически незначимо и может быть результатом случайного шума. Если же столбик выходит за пределы доверительного интервала, это указывает на наличие значимой автокорреляции для данного лага.

Мы видим, что в нашем случае есть значимая автокорреляция 1) с предыдущим, 2) пред-предыдущим и 3) пред-пред-предыдущим значениями целевой функции, а со всеми другими значениями автокорреляция не является значимой. Поэтому имеет смысл включить в наш датафрейм смещения на 1, 2 и 3 момента времени. Для этого воспользуемся методом shift библиотеки pandas:

```
data['target_pred_1'] = data['target'].shift(1)
data['target_pred_2'] = data['target'].shift(2)
data['target_pred_3'] = data['target'].shift(3)
```

Датафрейм приобретает дополнительно три столбца:

	date	target	target_pred_1	target_pred_2	target_pred_3
0	2022-10-01	1.0	NaN	NaN	NaN
1	2022-10-08	1.0	1.0	NaN	NaN
2	2022-10-15	0.9	1.0	1.0	NaN
3	2022-10-22	0.8	0.9	1.0	1.0
…	…	…	…	…	…
96	2024-08-03	3.5	2.8	2.1	1.6
97	2024-08-10	4.2	3.5	2.8	2.1
98	2024-08-17	4.4	4.2	3.5	2.8
99	2024-08-24	3.8	4.4	4.2	3.5

В полученной таблице значения целевой функции повторяются по диагонали: справа-вниз-налево. Однако, в таблице есть пропуски: у нулевого значения нет предыдущего, у первого нет пред-пердыдущего, а у второго нет пред-пред-предыдущего. Поэтому первыми тремя строками придется пожертвовать: мы удаляем их методом dropna:

```
data = data.dropna()
```

Теперь в датафрейме 97 записей (с 3 по 99) и, по сути, четыре столбца: целевая функция target и три предиктора, которые получились смещением целевой функции (строковый столбец с датами мы, как и выше, не будем использовать в авторегрессионных моделях).

5.2. Кросс-валидация временного ряда. Учитывая полученные выше результаты (см. п. 4), мы не станем применять train-test сплит и классическую кросс-валидацию для оценки наших моделей, а перейдём сразу к кросс-валидации временного ряда.

По сути, нам достаточно сформировать новые левую правую части регрессионной задачи:

X = data[['target_pred_1', 'target_pred_2', 'target_pred_3']]

y = data['target']

После чего, мы можем буквально воспроизвести код кросс-валидации временного ряда, приведённый нами выше (см. п. 4.4). Результаты представлены в следующей таблице.

model	score
LinearRegression	0.8403
DecisionTreeRegressor	0.7333
SVR	0.6931
KNeighborsRegressor	0.6297
MLPRegressor	0.6299
RandomForestRegressor	0.6042
GradientBoostingRegressor	0.5711

5.4. Комментарий к полученным результатам. По сравнению с предыдущими результатами, мы видим замечательные оценки. Это говорит о том, что авторегрессия (заметим — найденная нами со второй попытки, после первой неудачной попытки построить прогноз по порядковым номерам наблюдений), может быть использована в качестве рабочего метода для прогноза нашего временного ряда.

Однако, гораздо интереснее то, что лучшей оказывается простейшая из моделей: линейная регрессия (оценка LinearRegression самая высокая). Это ещё одна из тех неожиданностей, о которых мы говорили в начале статьи. Почему примитивная линейная регрессия (даже без перехода к полиномиальным признакам) выигрывает у таких сложных моделей как градиентный бустинг GradientBoostingRegressor или нейронная сеть MLPRegressor? — ответ кроется именно в её примитивности. Сложные модели слишком подгоняют себя под обучающие данные, что понижает их обобщающую прогнозирующую способность. Линейная регрессия, в силу своей простоты, плохо подстраивается под обучающие данные, и это приводит к весьма неожиданному эффекту: на тестовых данных её прогноз оказывается точнее.

Иллюстрация прогнозируемых значений временного ряда, вычисленных моделью LinearRegression, приведена ниже (см. рис. 5). Здесь мы, используя последнее разбиение в кросс-валидации временного ряда (см. рис. 3), спрогнозировали крайний правый блок значений целевой функции.

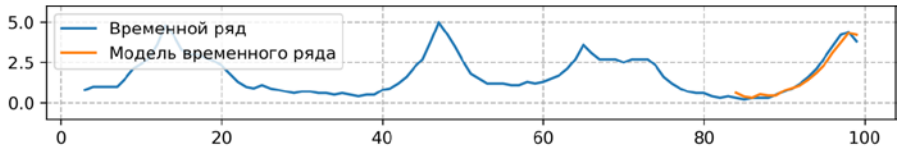


Рис. 5. Прогноз на последней тестовой выборке, полученный при помощи LinearRegression

6. Выводы. Главный, хотя и не единственный, вывод состоит в том, что если требующийся от модели прогноз зависит от времени, то к его оценке нельзя подходить с обычными методами вычисления метрик эффективности 1) простым разбиением на train и test, или 2) кросс-валидацией, не учитывающими временную природу данных. Другими словами, проведённое нами исследование наглядно показало необходимость применения специальной кросс-валидации при работе с временными рядами.

Кроме того, отметим важность инжиниринга признаков [17 – 19]. Лишь в тот момент, когда мы сгенерировали новые признаки, проанализировав автокорреляцию временного ряда и выполнив необходимые сдвиги целевой функции, мы получили рабочий датафрейм и корректно работающие модели. В принципе, мы могли бы продолжить инжиниринг признаков, и есть даже отчётливое понимание тех направлений, по которым можно было бы двигаться в построении новых признаков, но это выходит за рамки нашей небольшой заметки.

И наконец, нужно понимать, что поиск модели — это всегда творчество, и очень легко, получив хорошие цифры оценок, убедить себя в том, что задача решена на приемлемом уровне точности. И очень трудно взглянуть на свои результаты критически, заставить себя пересмотреть свои же методы, найти свои ошибки и исправить их.

Список литературы

1. Хейдт М. Изучаем Pandas. Москва: ДМК Пресс, 2018. 438 с.

2. Бурков А. Машинное обучение без лишних слов. СПб: Питер, 2020. 192 с.

3. Вьюгин В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. М.: МЦИМО. 2013. 387 с.

4. Бринк Х., Ричардс Дж., Феверолф М. Машинное обучение. СПб.: Питер, 2017. 336 с.

5. Осмонканов А.М., Абдиева Л.К., Курманбекова А.К. Обзор моделей прогнозирования временных рядов /Современные проблемы механики. 2020. № 39 (1). С. 35-41.

6. Тарасов В.И., Усманов М.О., Пономарев А.Д. Роль предобработки данных при прогнозировании временных рядов // В сборнике: Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных. Сборник статей II Всероссийской научной конференции: в 5 томах. Москва, 2023. С. 145-150.

7. Козловский В.Н. Методология анализа и прогнозирования качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, А.В. Заятров // Актуальные проблемы экономики. 2016. Т. 186. № 12. С. 387-398.

8. Козловский В.Н. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1 / В.Н. 9. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 1. С. 40-49.

10. Козловский В.Н. Проблема стратегического планирования улучшения качества и надежности системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, А.В. Заятров // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 1. С. 44-47.

11. Panyukov D. Development and research FMEA expert team model / D. Panyukov, V. Kozlovsky, Y. Klochkov // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. 2020. Т. 27. № 5. С. 2040015.

12. Инновационные механизмы управления потенциалом сферы сервиса в регионе / Л.И. Ерохина, О.Н. Наумова, Л.С. Любохинец, В.П. Лещишена, О.В. Любохинец, Г.М. Кулапина, О.В. Маркова, Н.В. Никитина, И.А. Калашникова, В.Н. Дудко, Е.В. Мещерякова, В.Н. Козловский, С.Н. Цветкова, Т.В. Кретинина, Е.А. Бреусова, С.В. Фатеева, С.Н. Новоселов, Н.М. Ульяницкая, М.М. Шаблыкин, Г.А. Буряков и др. // Тольятти, 2013.

13. Дебелов В.В. Моделирование электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости / В.В. Дебелов, В.В. Иванов, В.Н. Козловский, В.И. Строганов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 6. С. 2-7.

14. Козловский В.Н. Концепция методологии комплексной программы улучшений / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.В. Айдаров, Д.И. Панюков, Р.Д. Фарисов // Стандарты и качество. 2022. № 7. С. 36-42.

15. Строганов В.И. Математическое моделирование основных процессов электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин, Л.Х. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 7. С. 129-132.

16. Панюков Д.И. Новое руководство по FMEA: структурный анализ процессов / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2020. № 10. С. 36-42.

17. Козловский В.Н. Моделирование электронной системы VVT управления двигателем легкового автомобиля / В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 4. С. 5-12.

18. Козловский В.Н. Стратегическое планирование конкурентоспособности с точки зрения качества / В.Н. Козловский, С.А. Шанин, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2017. № 3. С. 76-80.

19. Дебелов, В.В. Электронная система управления автомобиля "START-STOP" / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 2. С. 6-9.

Мосин Владимир Геннадьевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, yanbacha@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

METHODOLOGY FOR SEARCHING AND EVALUATING THE PREDICTIVE MODEL OF CALLS TO CAR WARRANTY SERVICE POINTS

V.G. Mosin

The methodological foundations of building a machine learning model based on a time series of calls to car warranty service points of one of the largest domestic automakers are considered. Special attention is paid to methods of estimating predictive ability specific to time series.

Key words: üuality management, automotive, warranty service, data analysis, times series, machine learning, regression, pandas, numpy, skylearn.

Mosin Vladimir Gennadievich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, yanbacha@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 004.413
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-132-133

ДЕТЕКЦИЯ АНОМАЛИЙ В ПРОЦЕССЕ ГАРАНТИЙНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ ПО МЕТОДИКЕ MCCP (MODELING, CALIBRATION, CHALLENGE, PRODUCTION)

В.Г. Мосин, В.Н. Козловский, С.А. Васин, О.В. Пантюхин

Статья посвящена авторской методике MCCP, позволяющей детектировать аномальные состояния процесса гарантийного обслуживания автомобилей с использование технологий искусственного интеллекта и анализа больших данных. Излагаются основные принципы и этапы этой методики. В качестве примера демонстрируется работа по методике MCCP с данными одного из ведущих отечественных автопроизводителей.

Ключевые слова: управление качеством, автомобилестроение, гарантийное обслуживание, анализ данных, временные ряды, машинное обучение, регрессия, pandas, numpy, skylearn.

1. Введение. Своевременная детекция аномалий в процессе постпродажного обслуживания автомобилей является неотъемлемой частью стратегии управления качеством и безопасности, что в конечном итоге влечёт за собой улучшение финансовых показателей и повышения доверия со стороны клиентов [1, 8, 9]. Отметим несколько ключевых аспектов этой темы:

Безопасность. Аномалии указывают на потенциальные проблемы, которые могут угрожать безопасности водителя и пассажиров. Быстрая реакция на такие ситуации может предотвратить аварии и травмы [2, 10, 11].

Качество обслуживания. Детекция аномалий позволяет оперативно выявлять и устранять проблемы в обслуживании, что поднимает уровень сервиса и удовлетворённость клиентов. Это важные факторы для поддержания лояльности клиентов [3, 12].

Снижение затрат. Прогнозирование и выявление аномалий может помочь в предотвращении более серьёзных и дорогостоящих ремонтов. Чем раньше проблема будет обнаружена, тем меньше затрат потребуется на её устранение [4, 13, 14].

Анализ и улучшение данных. Выявление аномальных состояний позволяет собирать данные для анализа причин и возможных улучшений в постпродажном обслуживании, что может привести к более эффективным процессам и повышению качества продукции.

Поддержание репутации бренда. Качественное и безопасное постпродажное обслуживание способствует укреплению репутации автопроизводителей и дилеров, что в свою очередь влияет на их конкурентоспособность на рынке.

В настоящей работе мы демонстрируем авторскую методику MCCP (Modeling, Calibration, Challenge, Production), которая позволяет автоматизировать и ускорить процесс детекции аномалий в процессе гарантийного обслуживания автомобилей, основываясь на данных одного из ведущих отечественных автопроизводителей.

1.1. Теоретическая часть. Важную роль в работе автопромышленного комплекса играет экспертный корпус. Это хорошо образованные, блестяще знающие свою предметную область специалисты, одна из функций которых состоит в управлении показателями качества того или иного процесса производства или постпродажного обслуживания автомобилей и своевременное выявление опасных (или потенциально опасных) состояний.

Однако, привлечение высококвалифицированных специалистов требует значительных финансовых ресурсов: эксперты хорошо работают, но они работают за большие (а иногда очень большие) деньги и могут быть ограничены в своём количестве. Экспертам необходимо время для анализа данных, выявления аномалий и разработки рекомендаций, и их экспертиза может продолжаться неопределённо долго, особенно если объем данных велик. Наконец, не последнюю роль в работе экспертов играет человеческий фактор, который приводит к субъективности в оценках: разные эксперты могут по-разному интерпретировать одни и те же данные, а это ведёт к нестабильности в выводах.

Мы хотим снизить риски, сопряжённые с работой экспертного корпуса, делегировать часть их полномочий технологиям искусственного интеллекта, в частности — прогнозирующим моделям, которые могли бы выявлять аномалии не хуже людей, при этом быстро, однозначно и, что немаловажно, бесплатно.

1.2. Технологии. Мы работаем с данными в среде Jupyter Notebook, которая предоставляет удобные инструменты для работы с языком программирования Python и его основными библиотеками: numpy, pandas, sklearn и matplotlib (см. [1]-[4]).

2. Описание данных. Данные предоставлены одним из ведущих отечественных автопроизводителей в результате еженедельной фиксации сведений по одному из дефектов в одном из пунктов гарантийного обслуживания. Данные содержат два признака:

date: дата окончания недели в формате yyyy-mm-dd;

target: целевая функция, в качестве которой выступает процент обращений с данным дефектом в данный пункт гарантийного обслуживания от всех обращений в этот пункт в течение указанной недели.

Применяя метод read_csv библиотеки pandas, читаем данные из файла, получаем датафрейм data:

	date	target
0	2022-10-01	1.0
1	2022-10-08	1.0
…	…	…
98	2024-08-17	4.4
99	2024-08-24	3.8

В нем 100 записей, даты описаны как string, целевая функция — как float, пропусков нет, визуализация временного ряда представлена ниже (см. рис. 1).

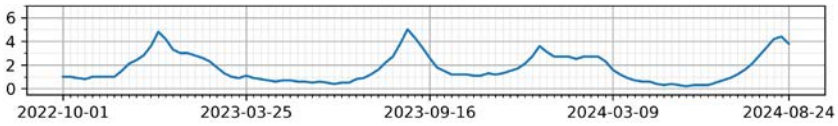


Рис. 1. Зависимость целевой функции от времени

3. Методика MCCP. Методика, которой посвящена настоящая работа, является авторской. Мы разбиваем все наши действия по детекции аномалий какого-либо процесса на четыре базовых этапа:

1. моделирование временного ряда,
2. калибровка отклонений модели от реальности,
3. испытание модели при помощи экспертной разметки,
4. боевое применение детектора в бизнес-процессе.

Соответственно, MCCP — это аббревиатура от названий этапов: modeling, calibration, challenge, production. Процесс формирования детектора является итерационным: детектор допускается к боевому применению только в случае успешно пройденных испытаний, в противном случае он возвращается на доработку, и число возвратов не ограничено.

Ниже мы подробно разберём все этапы, пока же следует отметить, что разбиение действий на последовательные этапы и разбиение данных — это не одно и то же, несмотря даже на то, что данные представляют из себя измерения в последовательные моменты времени. Для того чтобы это пояснить, обратимся к иллюстрации (см. рис. 1). Начнём с конца.

Этап боевого применения на нашей иллюстрации — это четвёртая четверть всего временного промежутка, то есть, отрезок с 2024-03-09 по 2024-08-24, этап испытаний — третья четверть с 2023-09-16 по 2024-03-09, этап калибровки — вторая четверть с 2023-03-25 по 2023-09-16, но этап моделирования, несмотря даже на то, что это первый этап методики, не равен первой четверти. Этап моделирования — это первая половина временного промежутка с 2022-10-01 по 2023-09-16.

Дело в том, что для формирования детектора владелец отдаёт нам не все данные, а только их стартовую часть: первую половину, и делает это для того, чтобы впоследствии провести испытание детектора в условиях, приближенных к боевым, то есть, на тех данных, которые были недоступны при обучении. Мы же заинтересованы в том, чтобы наша модель была как можно более точной, поэтому для обучения модели мы используем все доступные нам на этом этапе данные: всю первую половину.

Далее, на этапе калибровки отклонений, мы понимаем, что в самом начале своего обучения (на первых датах первой половины данных) модель была ещё плохо обучена, ошибалась чаще и сильнее, поэтому мы «прощаем» ей её ранние ошибки и для калибровки используем не всю первую половину данных, на которой училась модель, а только вторую половину первой половины, то есть, вторую четверть.

Когда наступает этап испытаний, мы, заинтересованные в точности модели, опять используем для обучения все имеющиеся у нас на этом этапе данные. Таким образом, данные, используемые на этапе испытаний — это не третья четверть, а три четверти: временной промежуток с 2022-10-01 по 2024-03-9.

И наконец, если детектор успешно проходит испытания и допускается к боевому применению, мы используем не четвертую четверть времени, а абсолютно все временные моменты, начиная с «начала времён»: с 2022-10-01. Так мы добиваемся того, что модель на каждом этапе не начинает учиться заново, а доучивается, постепенно становясь «умнее».

4. Моделирование. Это самый сложный и не поддающийся алгоритмизации этап. Человечество ещё не научилось писать универсальные модели, которые работают всегда, везде и на любых данных. Поэтому моделирование процесса в каждом конкретном случае — это всегда творчество (а не технология), а, значит, это не всегда успех (и даже не всегда отсутствие неудачи). В рамках этой статьи мы не можем продемонстрировать огромное разнообразие идей и приёмов, которые можно было бы использовать для построения модели, у нас другая задача: описать методику МССР и её приложение к детекции аномалий в процессе гарантийного обслуживания автомобилей. Поэтому мы просто применим авторегрессию и не будем сравнивать её с другими возможными идеями моделирования.

4.1. Ограничения по времени. Как мы уже отмечали выше, на этапах моделирования и калибровки в нашем распоряжении находятся не все данные, мы можем оперировать только с первой половиной датафрейма data. Применяя метод iloc библиотеки pandas, получаем соответствующую локализацию:

```
n_modeling   = round(0.5 *len(data))
data_modeling = data.iloc[:n_modeling]
```

Датафрейм data_modeling отличается от датафрейма data лишь тем, что в нем записей меньше: не 100, а 50. Далее на этапе моделирования мы будем работать с этим датафреймом.

4.2. Авторегрессия. Для построения авторегрессионной модели воспользуемся автокорреляцией временного ряда. Его коррелограмма представлена ниже (см. рис. 2). Видно, что в зону значимой корреляции попадают три ближайших значения, а более ранние коррелируют незначительно (точки соответствующих лагов попадают в закрашенную область). Поэтому в качестве предикторов модели мы будем использовать значения целевой функции, смещённые в прошлое на один, два и три шага.

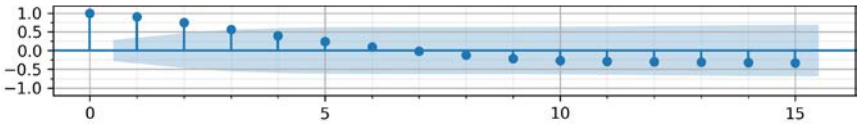


Рис. 2. Корреллограмма временного ряда

Для этого воспользуемся методом shift библиотеки pandas:

```
data_modeling['target_prev_1'] = data_modeling['target'].shift(1)
data_modeling['target_prev_2'] = data_modeling['target'].shift(2)
data_modeling['target_prev_3'] = data_modeling['target'].shift(3)
```

В результате получим датафрейм с тремя новыми столбцами, значения в которых повторяются по диагонали слева-вниз-направо:

	date	target	target_prev_1	target_prev_2	target_prev_3
0	2022-10-01	1.0	NaN	NaN	NaN
1	2022-10-08	1.0	1.0	NaN	NaN
2	2022-10-15	0.9	1.0	1.0	NaN
3	2022-10-22	0.8	0.9	1.0	1.0
…	…	…	…	…	…
46	2023-08-19	3.8	2.7	2.2	1.6
47	2023-08-26	5.0	3.8	2.7	2.2
48	2023-09-02	4.3	5.0	3.8	2.7
49	2023-09-09	3.5	4.3	5.0	3.8

Но при этом первые три строки содержат пропуски (что естественно, так как для этих моментов времени не хватает глубины наблюдений: у нулевого момента времени нет предыдущего и т. д.). Строки с пропусками мы удаляем:

```
data_modeling = data_modeling.dropna()
```

В результате остаётся датафрейм, содержащий 47 записей с 2022-10-22 по 2023-09-09:

	date	target	target_prev_1	target_prev_2	target_prev_3
3	2022-10-22	0.8	0.9	1.0	1.0
…	…	…	…	…	…
49	2023-09-09	3.5	4.3	5.0	3.8

Это набор данных, доступный нам для обучения модели и настройки её параметров. Здесь в качестве целевой функции выступает признак target, а в качестве предикторов — три признака: target_prev_1, target_prev_2 и target_prev_1, описывающие значение целевой функции в предыдущий, пред-предыдущий и пред-пред-предыдущий моменты времени соответственно. Признак date не сыграет в нашей модели никакой роли, он нужен нам лишь для того, чтобы ориентироваться в диапазонах дат.

4.3. Модели регрессионных задач. Есть множество методов построения регрессионной модели, начиная с классической линейной регрессии и заканчивая градиентным бустнгом на случайных лесах (см. [3], [4]). Мы формируем пул моделей из библиотеки sklearn:

1. LinearRegression: инструмент для построения линейной регрессии, который оценивает взаимосвязь между независимыми переменными и зависимой переменной, минимизируя среднеквадратичную ошибку;
2. DecisionTreeRegressor: алгоритм машинного обучения для регрессии, который строит дерево решений, разделяя данные на участки, оптимально предсказывая значения целевой переменной в каждом листе дерева;
3. SVR: реализация метода опорных векторов для регрессии, которая позволяет спрогнозировать зависимые переменные, минимизируя количество ошибок с использованием гиперплоскостей в многомерном пространстве;
4. MLPRegressor: многослойный перцептрон для решения задач регрессии, который обучается с использованием обратного распространения ошибки;
5. RandomForestRegressor: ансамблевый метод машинного обучения, который использует множество деревообразных регрессоров, обученных на различных подвыборках данных, чтобы предсказывать непрерывные значения за счёт усреднения результатов отдельных деревьев;
6. GradientBoostingRegressor: ансамблевый метод машинного обучения для решения задач регрессии, который строит предсказательную модель путем обучения последовательности более простых моделей (обычно деревьев решений), каждая из которых корректирует ошибки предыдущих.

Далее в ходе исследования мы в цикле прогоним через них обучающие данные и выберем ту модель, которая покажет лучшую прогнозирующую способность. Для этого ещё до обучения мы заводим список моделей model_list, по которым будем осуществлять цикл:

```
model_list = [LinearRegression(),
              DecisionTreeRegressor(),
              SVR(),
              MLPRegressor(),
              RandomForestRegressor(),
              GradientBoostingRegressor()]
```

4.4. Кроссвалидация модели временного ряда. При моделировании временных рядов модель должна делать прогноз, исходя только из тех сведений, которые доступны ей в момент прогноза (см. [5], [6]). Поэтому обучать модель можно только на предыдущих данных, а тестировать — на последующих. Мы применим алгоритм обучения, который постепенно наращивает обучающую выборку, а тестирование проводит на одном, следующем сразу после обучающей выборки значении (см. рис. 3, где схематично изображены третья, четвёртая и пятая итерации этой процедуры; синими точками отмечены моменты, доступные для обучения, а жёлтая точка — момент прогноза).

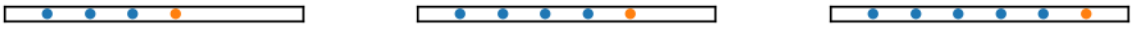


Рис. 3. Последовательные шаги кроссвалидации временного ряда

Это во многом похоже на обычную схему кроссвалидации временного ряда, которая реализована в библиотеке sklearn, с тою лишь разницей, что наш алгоритм учитывает максимально возможное количество фолдов: их будет ровно столько, сколько моментов времени мы можем спрогнозировать. Напомним (см. п. 4.2), что после препроцессинга у нас есть 47 записей, соответственно, мы можем сделать 46 прогнозов и провести 46 проверок.

Обычно для оценки прогнозирующей способности регрессионной модели используется коэффициент детерминации (см. [4]), но к нашему алгоритму его применить нельзя, так как на каждой итерации прогнозируется только одно значение, а для вычисления коэффициента детерминации необходимо как минимум два значения. Поэтому в качестве метрики эффективности прогноза мы применим среднее абсолютное отклонение прогнозируемого значения от истинного. Цепочка таких отклонений позволит оценить качество прогноза и выбрать наиболее качественную модель.

4.5. Выбор лучшей модели. Здесь нужно реализовать вложенный цикл: внешний цикл по регрессионным моделям, определенным нами выше (см. п. 4.3), а внутренний — по итерациям корссвалидации (см. п. 4.4). Поскольку нас интересует лучшая с точки зрения отклонений прогноза от реальности модель, на старте мы задаём значения двух переменных, а именно — считаем, что лучшая ошибка равна бесконечности, а лучшая модель отсутствует:

```
best_error = float('inf')
best_model = None
```

Опишем процедуру построения и оценки моделей. Пусть мы работаем с моделью model, и пусть мы находимся на i-й итерации кроссвалидации.

Чтобы получить обучающую выборку, нам нужно выполнить локализацию датафрейма data_modeling, оставив в нем только i первых строк (это делается при помощи метода iloc библиотеки pandas), а также назначить предикторы X_train и целевую функцию y_train (а это делается при помощи метода drop):

```
X_train = data_modeling.drop(columns = ['target', 'date']).iloc[np.arange(i)]
y_train = data_modeling['target'].iloc[np.arange(i)]
```

Так как прогноз делается на следующий после обучения момент времени, в качестве тестовых данных мы назначаем следующую строку датафрейма data_modeling, используя для этого локализацию по (i + 1)-й стоке:

```
X_test = data_modeling.drop(columns = ['target', 'date']).iloc[[i + 1]]
y_test = data_modeling['target'].iloc[[i + 1]]
```

Затем методом fit мы обучаем модель на обучающей выборке, и методом predict делаем прогноз на тестовой выборке:

```
model.fit(X_train, y_train)
y_pred = model.predict(X_test)
```

Теперь у нас есть ошибка (это разница между предсказанным значением y_pred и истинным значением y_test) и её абсолютная величина:

```
error = y_pred - y_test.to_numpy()
error_abs = abs(error)
```

Заносим абсолютное отклонение прогноза от реальности в список error_abs_list при помощи метода append:

```
error_abs_list.append(error_abs)
```

Все эти действия мы повторяем во внутреннем цикле, до исчерпания всех строк датафрейма data_modeling. По окончании внутреннего цикла у нас появляется возможность вычислить среднее отклонение и выяснить, превосходит ли очередная модель внешнего цикла ту, которая считается лучшей на внешней итерации, что мы и делаем при помощи условного оператора:

```
if np.mean(error_abs_list) < best_error:
    best_error = np.mean(error_abs_list)
    best_model = model
```

После завершения внешнего цикла имеем лучшую модель в переменной best_model. В целом результаты всех моделей представлены в следующей таблице:

model	error
LinearRegression	0.4623
DecisionTreeRegressor	0.4811
SVR	0.5830
MLPRegressor	0.5562
RandomForestRegressor	0.5511
GradientBoostingRegressor	0.5457

Лучшей из моделей оказывается модель LinearRegression.

5. Калибровка. На этапе калибровки нам нужно определиться с теми допустимыми отклонениями прогноза от реальных значений, которые мы считаем нормальными, но превышение которых является аномалией. Посмотрим, насколько хорошо наша модель (теперь это одна модель, определённая нами на предыдущем этапе, а именно — модель LinearRegression) справляется с временным рядом (см. рис. 4).

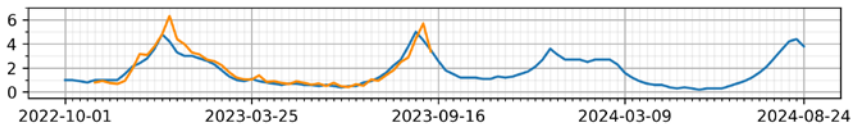


Рис. 4. Истинные и спрогнозированные значения временного ряда на этапе моделирования

Видно, что на начальном отрезке этапа моделирования, на первых примерно 15-20 датах модель, обладая небольшим количеством данных для обучения, ведёт себя неуверенно, ошибается часто и сильно. Однако постепенно её отклонения от реальности становятся меньше и происходят реже. Поэтому мы не станем использовать весь набор данных для калибровки, а поступим более требовательно по отношению к прогнозирующей способности: возьмём для калибровки только вторую половину модельных данных, то есть, ту её часть, где отклонения меньше, а модель уже обладает определённой стабильностью.

5.1. Данные для калибровки. Сначала мы пополним датафрейм data_modeling дополнительными, полученными на предыдущем этапе сведениями: предсказанным значением, ошибкой и абсолютным значением ошибки. Получим таблицу:

	date	target	predict	error	abs_error
3	2022-10-22	0.8	NaN	NaN	NaN
4	2022-10-29	1.0	0.8000	-0.2000	0.2000
5	2022-11-05	1.0	0.9199	-0.0800	0.0800
…	…	…	…	…	…
47	2023-08-26	5.0	4.4260	-0.5739	0.5739
48	2023-09-02	4.3	5.7015	1.4015	1.4015
49	2023-09-09	3.5	3.3783	-0.1216	0.1216

Затем исполним локализацию этого датафрейма на его вторую половину, воспользовавшись срезом по массиву индексов:

```
data_calibration = data_modeling[round(0.5 * n_modeling):n_modeling]
```

В итоге в нашем распоряжении окажется датафрейм с данными для калибровки, содержащий 25 записей:

	date	target	predict	error	abs_error
25	2023-03-25	1.1	1.0422	-0.0577	0.0577
…	…	…	…	…	…
49	2023-09-09	3.5	3.3783	-0.1216	0.1216

5.2. Распределения отклонений. Для корректной работы с порогами отклонений, важно понимать, каковы их распределения (или хотя бы знать, являются ли они нормальными).

5.2.1. Распределение ошибок. Пользуясь методом histplot библиотеки seaborn, визуализируем распределение ошибок error в виде гистограммы с наложенной на неё кривой плотности:

```
sns.histplot(data_calibration['error'], kde=True, bins=10)
```

Получим следующую кривую (см. рис. 5), по которой сразу становится ясно, что ошибки распределены по нормальному закону с нулевым средним.

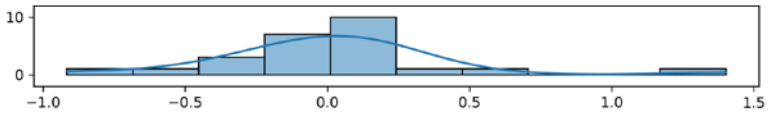


Рис. 5. Гистограмма и кривая распределения ошибок

5.2.2. Распределение абсолютных ошибок. Точно так же поступаем с распределением абсолютных ошибок abs_error. Соответствующая визуализация представлена ниже (см. рис. 6), и она даёт нам понимание того, что распределение абсолютных ошибок не подчиняется нормальному закону.

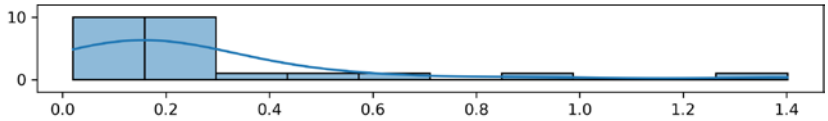


Рис. 6. Гистограмма и кривая распределения абсолютных ошибок

5.3. Калибровочные границы отклонений. Мы знаем, что распределение ошибок подчинено нормальному закону, что не удивительно, так как большинство ошибок распределяются именно по кривой Гаусса. Поэтому к такому типу отклонений мы можем применить правило трёх сигм или его модификации, о чем будет сказано позже, на этапе прохождения испытаний (см. п. 6). Мы знаем также, что распределение абсолютных ошибок не является нормальным, следовательно, к нему нельзя применять ни правило трёх сигм, ни его вариации.

Таким образом, к двум разным типам распределений мы подойдём с разными же критериями того, где кончается норма и начинается аномалия.

5.3.1. Критерий k сигм. Речь идёт о хорошо известном правиле трёх сигм с поправкой на коэффициент. На самом деле, правило трёх сигм является эмпирическим, и ничто не мешает говорить о правиле двух сигм или двух с половиной сигм. Параметр k мы объявляем свободным, оставляя за собой право варьировать его в случае необходимости (а такая необходимость может возникнуть позже, на этапе испытаний).

Мы вычисляем sigma как среднее квадратичное отклонение столбца error (значения этого столбца распределены нормально, и мы имеем право применять критерий k-сигма), а коэффициент выставляем в классическую тройку (варьировать его мы будем позже):

```
k_sigma = 3
sigma = data_calibration['error'].std()
```

Величина k_sigma*sigma и есть та самая граница, преодоление которой мы признаем аномалией. В силу того, что ошибка error центрирована относительно нуля, её отклонение от нуля (как налево, так и направо) на величину , большую чем k_sigma*sigma, детектируется как аномалия. Выполняя локализацию датафрейма data_calibration, получаем список всех аномальных значений по правилу трёх сигм:

```
out_sigma = data_calibration[abs(data_calibration['error']) > k_sigma * sigma]
```

Оказывается, что этот список содержит единственную аномалию:

	date	target	predict	error	abs_error
48	2023-09-02	4.3	5.7015	1.4015	1.4015

Визуализация этапа калибровки представлена ниже (см. рис. 7).

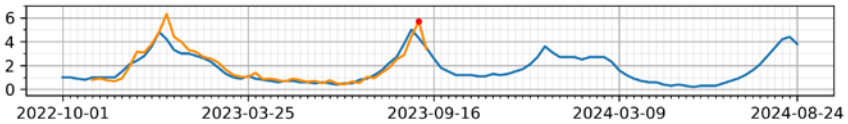


Рис. 7. Калибровка отклонений error по правилу трёх сигм

На этом рисунке хорошо видно, что отклонение, отмеченное нами как аномальное, на самом деле меньше тех отклонений, которые демонстрировала наша модель на начальных датах своего обучения. Если бы мы не исключили их из рассмотрения, детектированная дата вообще не была бы признана аномальной, её превзошли бы другие, более ранние даты.

5.3.2. Критерий k интерквартильных размахов. Здесь мы применим интерквартильный размах (который можно применять к любым распределениям, а не только к нормальным), опять-таки с поправкой на коэффициент.

Напомним, что интерквартильный размах — это метод определения выбросов, в котором устанавливаются нижняя граница lower_bound и верхняя граница upper_bound, после чего все, что находится внутри этих границ, считается нормой, а все, что выходит за границы, считается аномалией. Нижняя граница вычисляется как первый квартиль минус полтора интерквартильных размахов, верхняя граница — как третий квартиль плюс полтора интерквартильных размахов, а коэффициент 1.5 (так же, как и коэффициент 3 в правиле трёх сигм) является эмпирическим и при необходимости может меняться.

Работая уже со столбцом абсолютных ошибок abs_error (а не со столбцом error как в предыдущем случае), мы вычисляем первый и третий квартили при помощи метода quantile, после чего их разность даёт нам интерквартильный размах:

```
Q1 = data_calibration['abs_error'].quantile(0.25)
Q3 = data_calibration['abs_error'].quantile(0.75)
IQR = Q3 - Q1
```

Затем выставляем коэффициент в классическое значение 1.5 (варьировать коэффициент мы будем позже, на этапе испытаний) и вычисляем нижнюю и верхнюю границы отклонений:

k_inter = 1.5
lower_bound = Q1 - k_inter * IQR
upper_bound = Q3 + k_inter * IQR
Далее, задаём два условия, выполнение хотя бы одного из которых означает аномалию:
lower_condition = data_calibration['abs_error'] < lower_bound
upper_condition = data_calibration['abs_error'] > upper_bound
И наконец, выполняем локализацию датафрейма data_calibration по их объединению:
out_inter = data_calibration.loc[lower_condition | upper_condition]
Получаем датафрейм с записями, детектированными как аномалии по интерквартильным размахам. В нем фигурируют три даты:

	date	target	predict	error	abs_error
46	2023-08-19	3.8	2.8831	-0.9168	0.9168
47	2023-08-26	5.0	4.4260	-0.5739	0.5739
48	2023-09-02	4.3	5.7015	1.4015	1.4015

Визуализация калибровки при помощи этого метода представлена ниже (см. рис. 8).

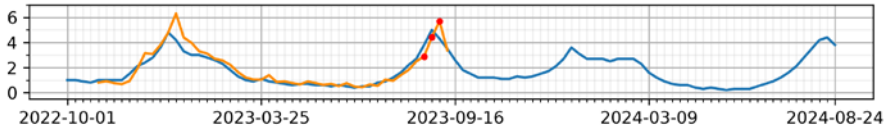


Рис. 8. Калибровка отклонений abs_error по интерквартильному размаху

5.4. Численные значения калибровочных границ. После этапов моделирования и калибровки наша модель накопила достаточно сведений об отклонениях от реальности и уже может судить о наблюдаемых значениях целевой функции как о нормальных или аномальных. Это суждение основано на знании границ отклонений, которые мы вычислили в предыдущем пункте, но не вывели их в явном виде.

При апелляции к ошибке error мы ориентировались на среднее квадратичное отклонение, ключевой величиной при этом являлась величина k_sigma * sigma. Её численное значение таково: k_sigma * sigma = 1.2347.

При апелляции к абсолютной ошибке abs_error мы ориентировались на величины нижней и верхней границ lower_bound и upper_bound, которые получались за счёт интерквартильного размаха. Их численные значения таковы: lower_bound = -0.1741, upper_bound = 0.5224, причём, заметим, что нижняя граница отрицательна и не играет никакой роли для абсолютных ошибок, существенной оказывается только верхняя граница.

Полученные критерии аномальности можно представить в виде следующей таблицы.

	error	abs_error
Норма	-1.2347 < error < 1.2347	abs_error < 0.5224
Аномалия	error < -1.2347 или error > 1.2347	abs_error > 0.5224

6. Испытания. Напомним (см. п. 3), что методика МССР — это итерационная процедура, модель и калибровка последовательно корректируются до тех пор, пока детектор не пройдёт испытания. На этапе испытаний детекция выполняется с двух сторон: с одной стороны ей занимается эксперт (или несколько экспертов), с другой стороны — полученный нами выше алгоритм, причём, испытание считается успешно пройденным, если алгоритм справляется в детекцией аномалий не хуже экспертов.

6.1. Алгоритмическая детекция аномалий. Чтобы алгоритмически обнаружить аномалии на этапе испытаний, нам достаточно применить найденную модель и найденные калибровочные границы к новым данным, которых у нас не было на этапах моделирования и калибровки. Для этого мы берём новый датафрейм data_challenge, дополненный по сравнению с датафреймом data_modeling:

n_challenge = round(0.75 *len(data))
data_challenge = data[:n_challenge]

Он отличается от датафрейма data_modelign лишь тем, что в нем больше позиций: не 50, а 75. С этим новым дополненным датафреймом data_challenge мы поступаем точно так же, как и с датафреймом data_modeling, а именно — проводим цикл по всем итерациям кроссвалидации (как это делалось в п. 4.5, только без выбора лучшей модели, потому что она нам известна) и сводим все отклонения в единую таблицу (как это делалось в п. 5.1).

В этот момент у нас есть все сведения для детекции аномалий на новом промежутке времени. Во-первых, есть таблица со значениями ошибок и абсолютных ошибок:

	date	target	predict	error	abs_error
3	2022-10-22	0.8	NaN	NaN	NaN
4	2022-10-29	1.0	0.8000	-0.2000	0.2000
5	2022-11-05	1.0	0.9199	-0.0800	0.0800
…	…	…	…	…	…
72	2024-02-17	2.7	2.7662	0.0662	0.0662
73	2024-02-24	2.7	2.6019	-0.0980	0.0980
74	2024-03-02	2.3	2.6212	0.3212	0.3212

А во-вторых, есть величины калибровочных отклонений, полученные нами в п. 5.3, с которыми мы можем сравнивать отклонения.

6.1.1. Критерий k сигм. По этому критерию мы работаем со столбцом error, и даже не со всем столбцом, а с той его частью, которая локализована на этап испытаний. Вводим условие калибровки и выводим датафрейм с аномалиями на нужном интервале:

condition = data_challenge['error']) > k_sigma * sigma
out_challenge_sigma = out_challenge[n_modeling:].loc[condition]

В результате обнаруживаем, что датафрейм out_challenge_sigma пуст, в нем нет ни одной записи. Соответствующая тривиальная визуализация представлена ниже (см. рис. 9).

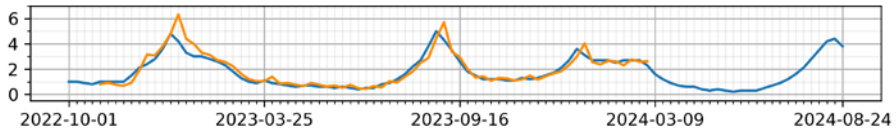


Рис. 9. Аномалии ошибок error на этапе испытаний не зафиксированы

6.1.2. Критерий k интерквартильных размахов. Аналогично применяем другой критерий:
condition = data_challenge['abs_error']) > upper_bound
out_challenge_inter = out_challenge[n_modeling:].loc[condition]
Получаем датафрейм с двумя записями:

	date	target	predict	error	abs_error
65	2023-12-30	3.6	2.9908	-0.6091	0.6091
66	2024-01-06	3.1	4.0271	0.9271	0.9271

Наш детектор обнаружил две позиции, которые счёл аномальными. Их визуализация представлена ниже (см. рис. 10).

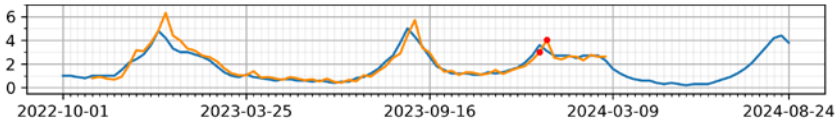


Рис. 10. Аномалии абсолютных ошибок abs_error на этапе испытаний

6.2. Экспертная детекция аномалий. К сожалению, в рамках этой работы мы не сможем продемонстрировать реальную экспертную оценку: для этого нужен реальный эксперт, или даже несколько экспертов, чтобы нивелировать возможные расхождения в мнениях, а их у нас нет. Поэтому мы изложим лишь умозрительную схему их работы, покажем, как могла бы работать экспертиза, если бы у нас были эксперты.

6.2.1. Разметка данных. Ориентируясь на свои опыт и знания в предметной области, эксперт оценивает значение целевой функции target в каждый момент времени на промежутке испытаний как нормальное (в таком случае к моменту времени приписывается метка 0) или аномальное (тогда приписывается 1). Это и называется разметкой данных: разметка норма/аномалия — это последовательность нулей и единиц

6.2.2. Пул разметок. Чтобы получить более объективную картину, экспертиза проводится несколькими экспертами. Каждый из них, независимо от своих коллег, формирует свою последовательность нулей и единиц, и, вообще говоря, это разные последовательности.

6.2.3. Пограничные состояния. В большинстве случаев мнения экспертов совпадают, но иногда расходятся, то есть, какие-то состояния процесса (или, другими словами, значения целевой функции в какие-то моменты времени) часть экспертов может признать нормальными, а другая часть — аномальными. Такие состояния называются пограничными.

6.3. Детекция аномалий как задача бинарной классификации. Разметку производит и наш детектор. Если посмотреть с позиций разметки данных на рис. 10, то красные точки на этапе испытаний с 2023-09-16 по 2024-03-09 — это единицы, а все остальные позиции этого промежутка времени заполнены нулями. Рис. 9 означает, что всё заполнено нулями, и нет ни одной единицы. По сути, детектор тоже даёт бинарную разметку, а это значит, что для сравнения результатов людей и алгоритма, мы можем сравнивать результаты бинарных классификаций, для оценки которых есть хорошо разработанный инструментарий в виде метрик бинарной классификации (см. [7]).

6.3.1. Метрика accuracy. Это наиболее очевидная из всех метрик классификации. Она вычисляется как доля (или процент) верных определений принадлежности к классу, её возможные значения лежат в пределах от 0 до 1 (или, если в процентах, от 0% до 100%), и чем выше accuracy, тем более качественной является классификация.

Существенный недостаток accuracy состоит в том, что эту метрику можно применять только к сбалансированным классам, когда представители классов распределены примерно поровну, а в случае классификации по принципу норма/аномалия – это, очевидно, не так: аномальных наблюдений всегда гораздо меньше. Если в детекции аномальных состояний ориентироваться на метрику accuracy, то нет ничего проще, чем получить «качественный» классификатор: достаточно каждое значение детектировать как норму. В силу того, что аномалий не может быть много, процент верно распознанных состояний будет необычайно высок, но при этом детектор не будет выполнять свою задачу — детектировать аномалии.

6.3.2. Метрики precision и recall. Метрика precision показывает, сколько среди объектов, детектированных как аномальные, действительно аномальных объектов (русский перевод метрики precision — точность), а метрика recall — сколько объектов среди всех аномальных объектов детектированы как аномальные (русский перевод recall — полнота). Возможные значения обеих метрик лежат в пределах от 0 до 1, и чем выше та или иная из метрик, тем качественнее классификация.

Если ориентироваться на метрику precision, то чтобы получить её высокое значение достаточно предъявить такой детектор, который распознаёт состояние как аномальное лишь в исключительных случаях, когда отклонение модели от реальности приобретает какие-то космические масштабы, и сомневаться в аномальности такого явления не приходится. Подавляющее большинство аномалий будет не замечено этим детектором, но его метрика precision будет необычайно высока.

И наоборот, если ориентироваться на метрику recall, то можно предъявить детектор, который реагирует на любое, самое незначительное отклонение модели от реальности. Такой детектор не пропустит ни одной аномалии, но среди всех состояний, признанных им аномальными, будет слишком много лишних, нормальных состояний.

6.3.3. Метрика F1. Слабое место метрик precision и recall в том, что если повышать одну из них, то тут же падает другая: добиваемся высокой точности — падает полнота, и наоборот, при высокой полноте падает точность. Один из способов учесть одновременно и то, и другое состоит в применении метрики F1, которая определяется как

среднее гармоническое метрик precision и recall. Её значения изменяются от 0 до 1, и чем выше значение метрики F1, тем качественнее классификатор.

Метрика F1 реализована в модуле metrics библиотеки sklearn в виде функции, на вход которой подаются предсказанные и истинные значения классов:

f1_score(y_pred, y_true)

В результате получается оценка качества предсказания классов, учитывающая одновременно и точность классификатора, и его полноту.

6.4. Сравнение алгоритмической и экспертной детекции. В ходе экспертизы у нас возникает некоторое количество экспертных разметок (по числу пригашенных экспертов), а с другой стороны, у нас есть алгоритмическая разметка. Для сравнения результатов людей и алгоритма можно использовать схему перебора экспертов, которая состоит в следующем.

Отбирается один эксперт, его разметка объявляется предсказанным значением классов y_pred_expert, а разметки всех остальных экспертов усредняются, и результат усреднения объявляется истинным значением классов y_true. Вычисляются две метрики F1:

f1_expert = f1_score(y_pred_expert, y_true)

f1_detector = f1_score(y_pred_detector, y_true)

где y_pred_detector — результат алгоритмической детекции. Побеждает либо человек, если f1_expert > f1_detector, либо алгоритм, если соотношение метрик обратное.

Затем отбирается следующий эксперт и производится ещё одно сравнение и т. д. Если общее количество побед алгоритма превышает общее количество его поражений, испытание считается успешно пройденным, в противном случае детектор отправляется на доработку.

6.5. Коррекция детектора. Если наш детектор не прошёл испытания (отметим, что в этом нет ничего катастрофичного, это нормальная практика оптимизации алгоритма), работа продолжается, а если быть точным, в этот момент она только начинается, потому что при разработке детектора мы приняли целый ряд совершенно произвольных, ничем не обоснованных решений.

6.5.1. Критерии аномальности. Мы совершенно произвольно применили в качестве критериев аномальности правило трёх сигм и интерквартильный размах. Поправить эти критерии совсем не сложно, достаточно изменить значения коэффициентов k_sigma и k_inter (см. пп. 5.3.1, 5.3.2) и заново прогнать метки классов y_pred_detector через метрику F1. Но можно изменить и сам подход к критериям, и назначать аномалии, исходя из совсем других соображений.

6.5.2. Тюнинг моделей. Мы даже не попытались настроить параметры наших моделей при выборе лучшей из них (см. п. 4.5). Все модели обучались с дефолтными параметрами, но вполне возможно, что после тюнинга лучшей оказалась бы не LinearRegression, а какая-то другая модель, и это могло привести к лучшим результатам на этапе испытаний.

6.5.3. Препроцессинг. Мы использовали идею авторегрессии (см. п. 4.2) для формирования предикторов, но даже не пытались усилить её за счёт дополнительных мер, например, таких как предварительное сглаживание временного ряда, у которого, в свою очередь, тоже есть целый ряд собственных параметров и их тоже можно и нужно настраивать.

6.5.4. Инжиниринг данных. Кроме того, мы не запросили у владельца процесса никаких дополнительных сведений, мы просто обработали доставшийся нам временной ряд (см. п. 2), в котором было всего 100 записей. А это не единственный в своём роде пункт гарантийного обслуживания автомобилей, число таких пунктов измеряется десятками, и, сравнивая подобные процессы в разных локациях, мы могли бы с большей уверенностью судить об аномальных состояниях.

Неудачные испытания — это не провал, а повод для поиска лучшего решения, и способов улучшить или принципиально изменить решение чрезвычайно много.

7. Заключение. Мы рассмотрели лишь один пример применения методики MCCP (Modeling, Calibration, Challenge, Production), а между тем, эта методика является универсальной.

В-первых, она не зависит от природы процесса. Процесс может быть любым, важно лишь, 1) чтобы в нем было достаточное количество наблюдений для построения адекватной модели, и 2) чтобы было экспертное сообщество, способное отличить норму от аномалии.

Во-вторых, методика MCCP не навязывает никаких рамок: можно применять любую модель, использовать любые критерии калибровки отклонений и проводить сравнение экспертной и алгоритмической разметки по любой схеме. С одной стороны, это развязывает руки разработчикам детектора, но с другой стороны, это оставляет вас один на один с проблемой: да, можно применять любую модель, но какую именно, вам никто не подскажет; да, можно использовать любой критерий аномальности, но какой именно, вы узнаете только в случае успешных испытаний и т. д. Эта методика сама по себе не является ни алгоритмом, ни технологией, именно поэтому она универсальна.

Наконец, действуя в парадигме MCCP, можно изучать не только процессы, но и множества, но уже это тема новой работы, которой будет посвящена одна из следующих статей.

Список литературы

1. Хейдт М. Изучаем Pandas. Москва: ДМК Пресс, 2018.

2. Бурков А. Машинное обучение без лишних слов. СПб: Питер, 2020. 192 с.

3. Вьюгин В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. М.: МЦИМО. 2013. 387 с.

4. Бринк Х., Ричардс Дж., Феверолф М. Машинное обучение. СПб.: Питер, 2017. 336 с.

5. Kurovsky S.V., Mishin D.A., Lezhnin D.S., Burdik V., Kurovskaya M.A. Time series econometrics: Basic terms of time series analysis and forecasting // Innovation & Investment. 2024. № 8. С. 497-502.

6. Яппаров И.И. Анализ временных рядов и прогнозирование // XXVI Туполевские чтения (школа молодых учёных). Материалы Международной молодёжной научной конференции. Сборник докладов. Казань, 2023. С. 2796-2801.

7. Иванов С.В. Метрики классификации задач машинного обучения // В сборнике: Актуальные проблемы и перспективы развития экономики. труды XIX Всероссийской с международным участием научно-практической конференции. Симферополь, 2020. С. 173-174.

8. Козловский В.Н. Мониторинг удовлетворенности потребителей качеством автомобилей / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2016. № 6. С. 100-105.

9. Козловский В.Н. Цифровизация и проблемы трудовых коллективов: роли и ответственность / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.И. Панюков, Р.Р. Гафаров // Стандарты и качество. 2022. № 1. С. 94-98.

10. Панюков Д.И. Моделирование процедуры FMEA: анализ рисков / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 9. С. 34-43.

11. Слукин А.М. Имитационное моделирование электронной системы определения вязкости масла в силовом агрегате автомобиля / А.М. Слукин, В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.В. Иванов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 5. С. 2-4.

12. Панюков Д.И. Моделирование процедуры FMEA: методология и стратегия / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 7. С. 30-38.

Панюков Д.И. Программное обеспечение для поддержки метода FMEA / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 6. С. 42-49.

13. Козловский В.Н. Оценка реакции автопроизводителя на запросы потребителей / В.Н. Козловский, Г.Л. Юнак, Д.В. Айдаров, С.А. Шанин // Стандарты и качество. 2017. № 6. С. 80-85.

14. Козловский В.Н. Имитационная модель зарядного баланса автомобильного электрооборудования / В.Н. Козловский, Д.И. Гурьянов, А.Д. Немцев // Автотракторное электрооборудование. 2002. № 5-6. С. 12.

Мосин Владимир Геннадьевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, yanbacha@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Козловский Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Kozlovskiy-76@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Васин Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор, vasin_sa53@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пантюхин Олег Викторович, д-р техн. наук, доцент, директор Издательства, olegpantyukhin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANOMALY DETECTION IN THE PROCESS OF CAR WARRANTY SERVICE USING THE MCCP METHOD (MODELING, CALIBRATION, CHALLENGE, PRODUCTION)

V.G. Mosin, V.N. Kozlovsky, S.A. Vasin, O.V. Pantyukhin

The article is devoted to the author's MCCP methodology, which allows detecting abnormal states of the car warranty service process using artificial intelligence technologies and big data analysis. The basic principles and stages of this technique are described. As an example, the work on the MCCP methodology with data from one of the leading domestic automakers is demonstrated.

Key words: quality management, automotive, warranty service, data analysis, times series, machine learning, regression, pandas, numpy, skylearn.

Mosin Vladimir Gennadievich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, yanbacha@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Kozlovsky Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, Kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Vasin Sergey Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, vasin_sa53@mail.ru, Russia, Tula, Tula state University,

Pantyukhin Oleg Viktorovich, doctor of technical sciences, docent, Director of the Publishing House, olegpantyukhin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 005.63; 629.083
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-142-143

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Д.И. Панюков, О.В. Никишов, С.А. Васин, О.В. Пантюхин

Выполнен анализ проблем качества в сфере сервисного обслуживания автомобилей.На платформе ARIS Express разработана процессная модель предприятия сервисного обслуживания автомобилей.Для анализа и последующего улучшения процесса сервисного обслуживания и ремонта автомобилей были получены натурные данные с нескольких малых предприятий. Произведено статистическое имитационное моделирование процесса с использованием сгенерированных вариантов исходных данных времени выполнения операций в рамках общего процесса. Анализ полученных данных позволил выявить узкие места в процессе и оценить вероятность выполнения обслуживания в установленные сроки. Намечен подход для оценки эффективности улучшений связанных с анализом рисков, устранение которых приведет снижению задержек времени выполнения конкретных операций, а значит и времени ожидания клиентом.

Ключевые слова: обслуживание автомобилей, управление качеством, модель управления, процессная модель, статистическое имитационное моделирование, управление рисками.

Уровень качествауслуг автосервиса непосредственно влияет на удовлетворенность клиентов, на репутацию предприятия в целом и соответственно на рост его конкурентоспособности в сфере сервисного обслуживания автомобилей.

На качество обслуживания автомобилей в первую очередь оказывает влияние модель управления автосервисом. Эффективная модель управления позволяет улучшить качество обслуживания, сократить время выполнения работ и повысить уровень удовлетворенности клиентов.

Важнейшим элементом модели управления предприятием является организация процесса обслуживания автомобилей. Она должна быть четко структурирована и направлена на максимальное удовлетворение потребностей клиента. Весь цикл обслуживания, начиная с приема автомобиля и до его выдачи клиенту, необходимо контролировать.

В целом, модель управления автосервисом и качество обслуживания являются тесно связанными. Эффективная модель управления способна повысить качество обслуживания, привести к удовлетворенности клиентов и, как следствие, увеличить прибыль автосервиса[1, 3].

Управление качеством при сервисном обслуживании автомобилей должно быть основано на систематическом и проактивном подходе к улучшению качества услуг. На малых предприятиях это, возможно, будет более неформальным, чем на крупных компаниях, но формальный характер все же необходим.

Некоторые из формальных методов управления качеством, которые могут быть использованы на малых предприятиях, включают:

1. Установление политики качества: Важно разработать письменную политику качества, которая будет определять основные цели и принципы компании.

2. Обучение персонала: Каждый сотрудник должен быть проинструктирован в рамках политики компании и иметь понимание своей роли в обеспечении качества.

3. Системы управления качеством: Можно использовать систему управления качеством, например, ISO 9000, которая поможет компании в разработке и реализации процессов, необходимых для достижения целей качества.

4. Измерение (оценка) качества: Компания должна иметь систему измерения (оценки) качества, которая позволит отслеживать процессы и принимать меры для улучшения качества при необходимости.

5. Непрерывное улучшение: Важно постоянно работать над улучшением качества услуг, и для этого компания должна иметь механизмы по сбору обратной связи от клиентов и сотрудников.

В целом, формальный характер управления качеством при сервисном обслуживании автомобилей на малых предприятиях может варьироваться в зависимости от размеров компании и ее характеристик. Однако, все равно важно, чтобы компания имела ясные цели по улучшению качества услуг и определенные методы работы над ними.

Были проанализированы модели управления и бизнес-процессы предприятий по обслуживанию автомобилей. По итогам анализа предприятий можно сказать, что в общем виде модель предприятия сервисного обслуживания автомобилей - это организационная схема, описывающая основные структурные элементы, функции и бизнес-процессы предприятия по обслуживанию автомобилей.

Обобщенная схема модели предприятия сервисного обслуживания автомобилей представляет собой интегральную многоуровневую систему, в которой все структурные элементы взаимодействуют между собой, чтобы обеспечивать высокое качество и уровень сервиса клиентам.

Наиболее эффективной считается схема процесса, позволяющая обеспечить требуемое качество обслуживания, минимизировать временные затраты, а также тщательно контролировать все этапы процесса обслуживания и ремонта автомобилей. Важным аспектом является удовлетворенность клиентов, что может повысить лояльность и доверие к предприятию [2, 3].

Обобщенная универсальная схема предприятия сервисного обслуживания автомобилей на верхнем уровне состоит из следующих основных бизнес-процессов:

1. Обращение клиента на СТО – прием и обработка заявки.

2. Прием и визуальная диагностика автомобиля.

3. Планирование работ при приеме автомобиля.

4. Проверка наличия материалов и запчастей на складе и их заказ.

5. Выполнение работ на участках ремонта (кузовной, механический, агрегатный, диагностический, окрасочный, шиноремонтный и т.д.).

6. Контроль качества после ремонта автомобиля.
7. Оформление заказа.
8. Выдача автомобиля и документов.
9. Обратная связь с клиентом.

Каждый этап процесса тщательно контролируется и оптимизируется для максимальной эффективности и удобства клиентов. На СТО работают высококвалифицированные специалисты, которые имеют большой опыт в ремонте и обслуживании автомобилей различных марок и моделей, а в целом, данная модель СТО является надежным и профессиональным партнером для всех владельцев автомобилей, которые ценят качественный сервис и индивидуальный подход к каждому клиенту.

Каждый из основных бизнес-процессов включает в себя несколько подпроцессов, которые в свою очередь также включают в себя несколько этапов. Таким образом, формируется многоуровневая модель управления предприятием (рис. 1).

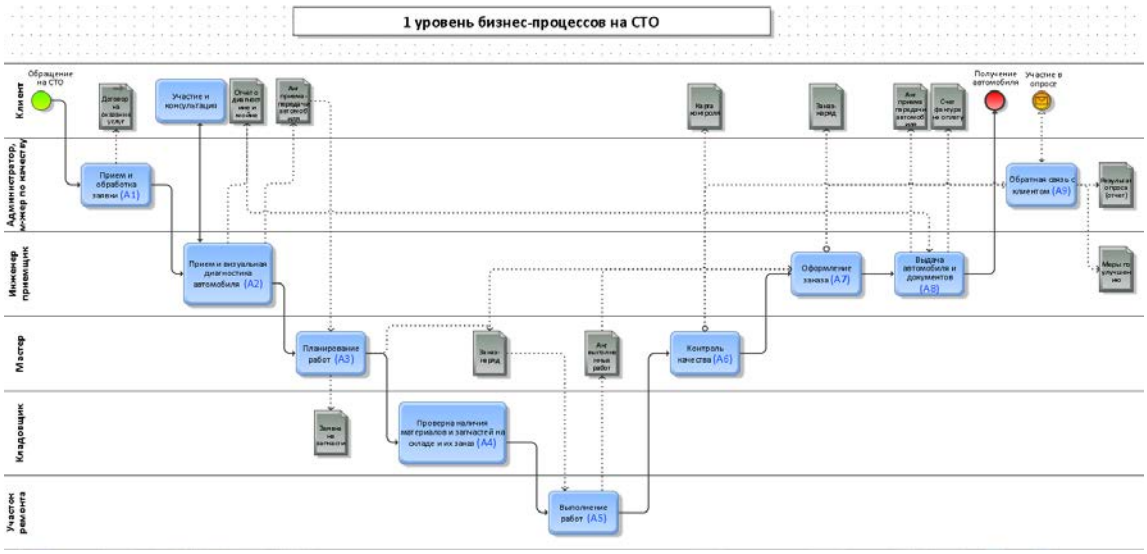


Рис. 1. Модель процесса сервисного обслуживания автомобилей в нотации BPMN (верхний уровень)

Для анализа и последующего улучшения процесса сервисного обслуживания и ремонта автомобилей необходимо оценить ряд параметров процесса, таких как время выполнения операций, качество выполнения работ и удовлетворенность потребителей. Для этого были обследованы несколько малых предприятий, в результате чего были получены натурные данные о среднем времени выполнения этапов технологического процесса сервисного обслуживания и ремонта автомобилей ($T_{ср.}$), разбросе по времени выполнения (стандартное отклонение σ_T). Полученные данные соответствуют малой выборке и предназначеныдля того, чтобы далее выполнить статистическое имитационное моделирование процесса сервисного обслуживания и ремонта.

Статистическое моделирование процесса позволяет получить прогнозируемое и статистически оправданное время выполнения всего процесса обслуживания ($T_{общ.}$) от момента приезда клиента и до момента выдачи ему автомобиля, а также время ожидания автомобиля клиентом ($T_{ож.}$), которое критически важно предприятию в ситуации, когда с клиентом обговаривается время выполнения заявленных работ. Максимально точное обозначение времени позволяет в большей мере удовлетворить клиента, так как в этом случае ему с меньшей вероятностью потребуется дополнительно ждать выдачи автомобиля в случае ошибочной оценки со стороны предприятия.

Для оценки времени выполнения процесса и, в частном случае, времени ожидания клиентом автомобилянеобходимо произвести статистическое имитационное моделирование процесса с использованием, как минимум, 1000 сгенерированных вариантов исходных данных времени выполнения операций в рамках общего процесса, т.к. полученных при натурном обследовании данных недостаточно для статистически достоверной оценки.

В общем виде, статистическое моделирование описывает случайные величины и процессы, характеризующие различные параметры сложного объекта или системы, позволяя заменить дорогостоящие длительные эксперименты. Оно используется для анализа различных систем, особенно когда аналитические решения затруднены или невозможны. Чем сложнее система, тем больше преимущества от статистических моделей. Основная проблема заключается в определении минимального числа реализаций для адекватного описания объекта, что влияет на точность оценок и затраты на расчеты.

Статистическая модель представляет собой алгоритм, имитирующий стохастический процесс функционирования системы, используя алгебру логики и методы математической статистики для описания соответственно структуры и особенностей функционирования системы и для количественной оценки надежности системы. Точность моделирования считается приемлемой в пределах 0,1–1,0% от оцениваемой величины.

Статистическое моделирование надежности систем включает четыре основных этапа: моделирование случайных событий и величин, построение вероятностных моделей функционирования, статистическую оценку результатов и определение ключевых показателей.

Модели состоят из статистических моделей элементов системы, их логических и математических взаимодействий, а также алгоритмов расчета и обработки результатов.

Методы имитационного моделирования, особенно метод Монте-Карло, позволяют анализировать параметры систем в условиях корреляции случайных изменений. Метод Монте-Карло основан на множестве статистических испытаний, что требует большого объема вычислений и представительной статистики. Эффективность метода

увеличивается с усложнением системы и взаимосвязей ее элементов, а также внешних воздействий, влияющих на систему.

При статистическом моделировании процесса сервисного обслуживания автомобилей необходимо знать значения и среднеквадратичное отклонение выбранных параметров. Случайным образом генерируются сочетания этих параметров, после чего вычисляется итоговое значение для каждого случая. На основе полученных данных определяются статистические характеристики как отдельных параметров, так и интегрального показателя качества процесса. Также можно построить гистограмму распределения, аппроксимированную кривой нормального распределения, и рассчитать моменты этого распределения, такие как математическое ожидание запаса прочности и среднеквадратичное отклонение.

В прогнозировании постепенных отказов имитационное статистическое моделирование становится особенно важным, так как оно позволяет оценить параметры надежности без необходимости в длительных и дорогостоящих экспериментальных исследованиях. При статистическом моделировании параметрических отказов необходимо определить ключевой параметр, скорость его изменения в зависимости от известных нагрузок и условий эксплуатации, а также законы их распределения. В этом процессе генерируются случайные сочетания всех условий с учетом указанных законов распределения. Для каждой реализации вычисляется скорость изменения ключевого параметра, например, износа. Затем определяется среднее значение этого параметра и его среднеквадратичное отклонение (СКО), а также вероятность безотказной работы при заданном предельном значении параметра.

Дополнительно можно разработать систему статистического моделирования, учитывающую влияние различных факторов, таких как усталость рабочего из-за высокой нагрузки, температура в помещении, нагрузка на ключевые точки процесса и формирование очередей. Эти факторы могут существенно влиять на время и качество выполнения каждого этапа, что позволит более точно прогнозировать надежность и эффективность обслуживания.

Для проведения имитационного моделирования процесса сервисного обслуживания автомобилей на СТО была разработанамодель, состоящая на верхнем уровне из 9 ключевых этапов (рис. 1). Каждый этап и подэтапбыли проанализированы на базе малых предприятий, и для них были определены параметры нормального распределения, включая среднее время выполнения и стандартное отклонение.

На базе пакета анализа из Microsoft Excel было сгенерировано 1000 случайных значений времени выполнения для каждого этапа, что позволило смоделировать различные сценарии обслуживания клиентов. За основу был взят закон нормального распределения. Эти данные затем были обработаны для определения общего времени выполнения процесса, времени ожидания автомобиля клиентом и других ключевых показателей.

Результаты моделирования показали, что общее время обслуживания варьируется в зависимости от различных факторов, например,таких как наличие запчастей и качество выполнения работ. Анализ полученных данных позволил выявить узкие места в процессе и оценить вероятность выполнения обслуживания в установленные сроки.

На диаграмме (рис. 2) представлена гистограмма, демонстрирующая распределение общего времени ожидания клиентоввыдачи автомобиля ($Т_{ож}$) и функция интегрального процента, эквивалентная зависимости времени обслуживания от наработки. Кривая показывает, что большинство случаев сосредоточены вокруг среднего значения, с постепенным уменьшением частоты по мере удаления от него.

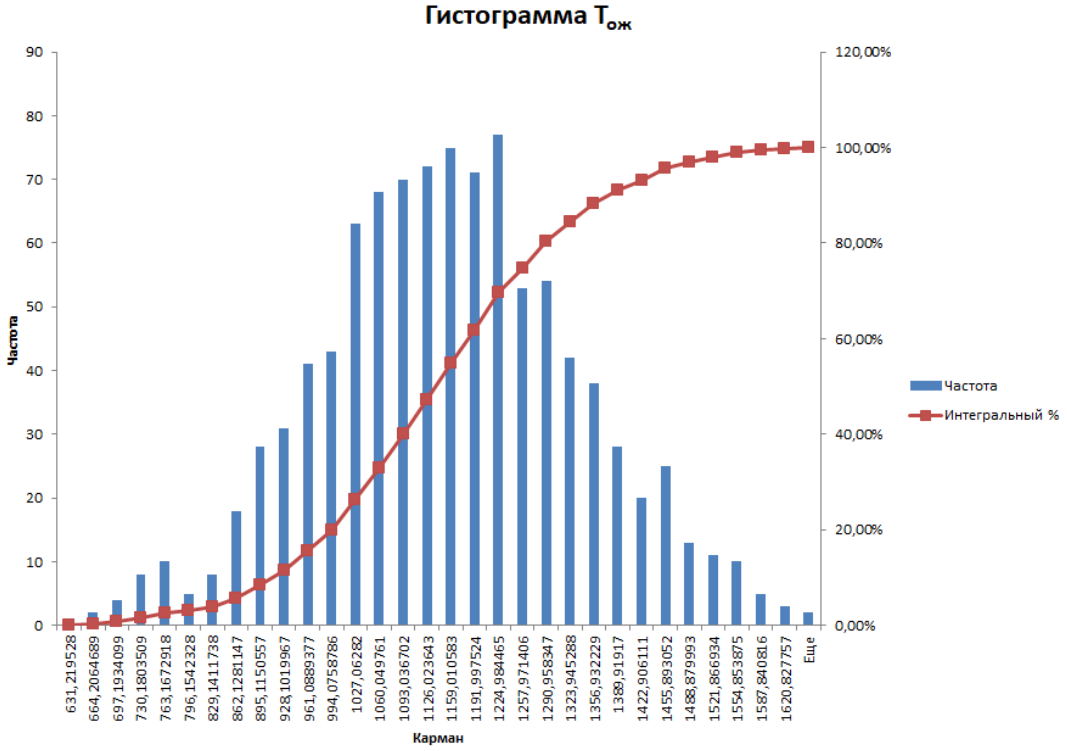


Рис. 2. Гистограмма распределения времени ожидания автомобиля $Т_{ожс}$

В рамках проведенной серии экспериментов были получены различные статистические результаты проведенного моделирования. Определены распределения таких параметров какполное время выполнения процесса $Т_{общ}$ и время ожидания клиентом автомобиля $Т_{ож}$. Построены графики распределения времени ожидания клиентом и времени выполнения процесса (рис. 3).

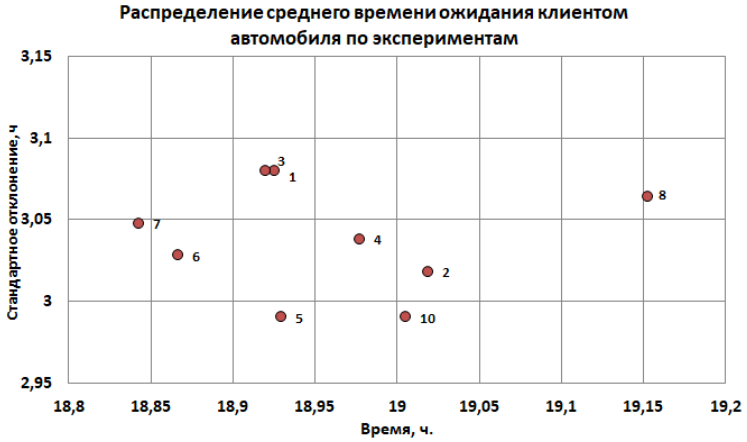


Рис. 3. Распределение результатов экспериментов (цифра обозначает номер эксперимента) по $T_{ож}$

Коэффициенты вариации среднего времени во всех проведенных экспериментах находятся в диапазоне от 15,7% до 16,8%, что вполне приемлемо. Кроме того, серия экспериментов в рамках имитационного моделирования показала высокую степеньсхождения таких результатов – средние значения и стандартные отклонения в серии находятся в очень узком диапазоне с коэффициентами вариации 0,5% и 1,8% соответственно.В дальнейшем этот факт позволяет производить единичные эксперименты для оценки среднего времени в рамках выбранного процесса с высокой достоверностью.

Таким образом, проведенное имитационное моделирование позволяетс высокой достоверностью, конечно с учетом влияния исходных данных, определять необходимое оценочное среднее время процесса, что позволяет, с одной стороны, точнее информировать клиентов, что повышает их удовлетворенность, а с другой стороны, позволяет глубже понять процесс обслуживания клиентов на СТО и выявить возможности для его оптимизации.

Представленный подход может быть также использован для оценки эффективности улучшений связанных с анализом рисков.В данном случае сначала проводится анализ рисков, принимаются меры по снижению рисков, улучшается технологический процесс. После чего проводится оценка всех этапов процесса с выявленными рисками, где были устранены проблемы, что привело к снижению рисков. При этом также собираются новые данные о времени выполнения этапов технологического процесса, и с помощью метода Монте-Карло проводится имитационное моделирование. Далее делается оценка эффективности проведенных мероприятий. Обычно в рамках корректирующих действий устраняются различные ошибки, сбои, которые приводили к задержкам времени выполнения операций, поэтому их устранение, в свою очередь, приводит к снижению задержек времени выполнения конкретных операций, а значит и времени ожидания клиентом сверх оговоренного срока в том числе. [4]

Список литературы

1. Никишов О.В. Моделирование и управление качеством процессасервисного обслуживания автомобилей // Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения : сборник материалов VIII Международной научной конференции молодых учёных. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2024. С. 289 – 297.

2. Козловский В.Н. Оценка качества деятельности предприятий фирменного автосервиса // Методы менеджмента качества. 2021. № 4. С. 34-40.

3. Панюков Д.И. Обзор проблем моделирования и управления качеством при техническом обслуживании автомобилей / Д. И. Панюков, О. В. Никишов // Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции / под ред. Н. М. Филькина. Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. С. 443 – 447.

4. Никишов О.В. Моделирование процессов и систем в управлении качеством сервисного обслуживания автомобилей // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических итехнологических систем АПК: сборник научных статей Вероссийской научнотехнической конференции, Курский государственныйаграрный университет имени И.И. Иванова. Курск: Изд-во ЗАО«Университетская книга», 2024. С. 158 – 162.

Панюков Дмитрий Иванови, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, panyukov.di@samgtu.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Никишов Олег Викторович, зав. лабораторией, старший преподаватель, аспирант, darts.samara@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Васин Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор, vasin_sa53@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пантюхин Олег Викторович, д-р техн. наук, доцент, директор Издательства, olegpantyukhin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STATISTICAL MODELING OF THE CAR SERVICE PROCESS

D.I. Panyukov, O.V.Nikishov, S.A. Vasin, O.V. Pantyukhin

The analysis of quality problems in the field of car service has been performed. A process model of a car service enterprise has been developed on the ARIS Express platform. For the analysis and subsequent improvement of the car service and repair process, field data from several small enterprises were obtained. Statistical simulation modeling of the process was performed using generated variants of the initial data on the time of operations within the overall process. The analysis of the obtained data allowed us to identify bottlenecks in the process and estimate the probability of performing service within the established time frame. An approach has been outlined for assessing the effectiveness of improvements related to risk analysis, the elimination of which will lead to a decrease in delays in the time of specific operations, and therefore the waiting time for the client.

Key words: car service, quality management, management model, process model, statistical simulation modeling, risk management.

Panyukov Dmitry Ivanovi, doctor of engineering sciences, professor, head of chair, panyukov.di@samgtu.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Nikishov Oleg Viktorovich, head of laboratory, senior lecturer, postgraduate, darts.samara@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Vasin Sergey Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, vasin_sa53@mail.ru, Russia, Tula, Tula state University,

Pantyukhin Oleg Viktorovich, doctor of technical sciences, docent, Director of the Publishing House, olegpantyukhin@mail.ru, Russia,Tula, Tula State University

УДК 005.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-146-147

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ ОТЗЫВНЫХ КАМПАНИЙ НОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Д.Р. Уразметова

В статье представлен обзор перспективных решений, направленных на повышение эффективности отзывных кампаний, включая разработку интерактивных платформ коммуникации с клиентами, внедрение систем управления данными о клиентах, автоматизацию процессов мониторинга качества, а также применение искусственного интеллекта для предсказания и предотвращения дефектов.

Ключевые слова: конкурентоспособность; качество; автомобильное производство; отзывные кампании.

В современном мире, где конкуренция на рынке автомобилей высока, качество продукции напрямую влияет на репутацию производителя, безопасность водителей и пассажиров, а также на финансовую устойчивость предприятия. Отзывные кампании, проводимые для устранения дефектов и неисправностей в продукции, стали неотъемлемой частью управления качеством. Однако, организация эффективных отзывных кампаний, способных минимизировать негативные последствия для производителя и клиентов, требует постоянного совершенствования инструментов и подходов.

Отзывные кампании – это неизбежная часть жизни любого производителя автомобилей, особенно в современном мире, где технологии постоянно развиваются, а требования к качеству продукции растут. Однако, сама по себе отзывная кампания не гарантирует успеха. Ключевую роль в этом процессе играет информирование клиентов, а точнее – его эффективность [1, 2].

Отзыв (продукции) – корректирующее действие, предпринятое после производства с целью защиты здоровья и безопасности потребителей в связи с использованием какой-либо продукции [1, 3].

Отсутствие своевременной и четкой информации об отзыве может стать большой проблемой для производителя, вызвав следующие негативные последствия:

1. Разочарование и недовольство клиентов. Подобное может произойти из-за задержки с информированием клиента о необходимости отзыва, что может привести к тому, что он самостоятельно попытается устранить проблему, потратив время и деньги, а также увеличив риск возникновения новых проблем [4, 5]. Также если клиент не знает о необходимости отзыва, он может продолжать эксплуатировать автомобиль с дефектом, подвергая себя и других риску. Нужно добиться того, чтобы владельцы автомобилей своевременно получали информацию непосредственно от автопроизводителя, по той причине, что у клиента узнавшего о проблеме из других источников (интернет, социальные сети, от других владельцев) может возникнуть чувство обмана, так как он может подумать, что производитель скрывает информацию о дефекте [6, 7].

2. Негативные отзывы в социальных сетях. В наше время информация распространяется с огромной скоростью из-за чего негативные отзывы в социальных сетях могут быстро получить широкое распространение, нанося серьезный ущерб репутации производителя, снизить доверие к бренду, заставив потенциальных покупателей отказаться от приобретения автомобиля этой марки, что способствует созданию негативного имиджа производителя [8, 9].

3. Финансовые потери. Негативные отзывы могут отпугнуть потенциальных покупателей, что приведет к снижению продаж и упущенной прибыли, в следствие чего необходимо будет тратить дополнительные средства на восстановление репутации и устранение негативных последствий неэффективного информирования [10].

Для улучшения инструментов организации отзывных кампаний следует рассмотреть следующие предложения:

Во-первых, развитие онлайн-платформ для отзыва. Необходимо улучшить функционал онлайн-платформ, чтобы обеспечить более удобный процесс регистрации и управления отзывными кампаниями [11, 12].

Онлайн-платформы для отзыва – это современные цифровые инструменты, которые позволяют производителям автомобилей упростить и ускорить процессы отзыва, обеспечив максимальную эффективность и минимальные негативные последствия для клиентов и бренда. На подобных платформах пользователи могут делиться своим опытом и оставлять отзывы о товарах, услугах, компаниях или местах. Эти отзывы могут быть положительными, отрицательными или нейтральными и помогают другим пользователям принять более информированное решение перед покупкой или использованием определенного продукта или услуги. Сайты отзывов клиентов позволяют комментировать и оценивать продукты/услуги, а также читать отзывы от других пользователей, которые могут помочь сформировать мнение о конкретном бренде или компании [2, 13].

Ключевые функции онлайн-платформ для отзыва:

1. Сбор информации: Платформа позволяет авторизованным дилерам и сервисным центрам регистрировать дефекты, выявленные у автомобилей, собирает информацию о гарантийных случаях, позволяя производителю анализировать распространенность дефектов и принимать обоснованные решения об отзыве. А также анализирует данные о дефектах, что позволяет выявлять тренды, определять причины неисправностей и принимать меры по предотвращению подобных проблем в будущем [14].

2. Управление отзывом: Система помогает организовать отзыв автомобилей, создавая список затронутых моделей, определяя объем необходимых запчастей и координируя действия дилерской сети; обеспечивает своевременное уведомление клиентов об отзыве через разные каналы (SMS, email, push-уведомления) с информацией о неисправности, необходимых действиях и контактах для связи; позволяет клиентам записаться на ремонт в удобное время в ближайшем авторизованном сервисном центре; позволяет следить за прогрессом ремонтных работ, предоставляя клиентам информацию о статусе отзыва [15].

3. Анализ и отчетность: Система генерирует отчеты о количестве затронутых автомобилей, прогрессе отзыва, финансовых затратах и других важных показателях и предоставляет возможность визуализировать данные о качестве, что позволяет легко выявлять тренды и принимать управленческие решения.

Преимущества использования онлайн-платформ для отзыва:

1. Ускорение процесса: Платформы автоматизируют процессы отзыва, что значительно ускоряет решение проблем и снижает время простоя автомобилей у клиентов.

2. Повышение эффективности: Система позволяет оптимизировать процессы отзыва, что снижает финансовые затраты и повышает эффективность использования ресурсов.

3. Улучшение коммуникации: Платформа обеспечивает более прозрачную и эффективную коммуникацию с клиентами, что повышает доверие к бренду и минимизирует негативные отзывы.

4. Снижение рисков: Система позволяет своевременно выявлять и устранять проблемы с качеством продукции, что снижает риски возникновения серьезных последствий.

Во вторых, улучшение коммуникации с клиентами: Необходимо ввести более интерактивные и персонализированные каналы коммуникации с клиентами, чтобы обеспечить своевременное и четкое информирование об отзыве. Для этого могут использоваться:

1. Интерактивные платформы такие как: специальный веб-сайт, посвященный отзывной кампании, с полной информацией о проблеме, процессе отзыва, часто задаваемыми вопросами, контактами для связи; чат-бот на сайте или в мобильном приложении, чтобы клиенты могли оперативно получать ответы на свои вопросы в любое время суток; виртуальный помощник: консультации клиентов с виртуальным помощником, который может ответить на вопросы о процессе отзыва, определить ближайший сервисный центр, записаться на ремонт.

2. Активное взаимодействие такое как:

Обратная связь - предоставление клиентам возможности оставить отзыв о процессе отзыва, высказать свои мнения и предложения;

Ответы на вопросы - оперативно отвечать на вопросы клиентов в социальных сетях, на форумах, в чатах.

Обновления статуса - регулярное информирование клиентов об ожидаемом времени ремонта, о статусе заявки, о решении проблемы.

3. Прозрачность и честность: необходимо подробно сообщать всю информацию о дефекте, автопроизводителю активно искать контакт с автовладельцами, в случае неудобств, связанных с отзывом, предоставить клиентам компенсацию в виде скидок, бонусов, бесплатного сервисного обслуживания.

Внедрение более интерактивных и персонализированных каналов коммуникации с клиентами позволяет укрепить доверие к бренду, уменьшить негативные последствия отзыва и создать позитивный образ производителя, заботящегося о своих клиентах.

В-третьих: внедрение искусственного интеллекта: ИИ может быть использован для автоматизации процесса мониторинга качества продукции, обнаружения дефектов и предоставления рекомендаций по отзыву.

Искусственный интеллект (ИИ) стремительно меняет правила игры во многих отраслях, и автомобильное производство не является исключением. Внедрение ИИ открывает новые возможности для автоматизации процесса мониторинга качества продукции, обнаружения дефектов и предоставления рекомендаций по отзыву [3].

ИИ может анализировать данные с датчиков, установленных на производственном оборудовании, чтобы выявлять отклонения от нормальных показателей в реальном времени. Это позволяет своевременно реагировать на изменения и предотвращать появление дефектов.

Осуществлять визуальный контроль - системы машинного зрения, основанные на ИИ, могут автоматически выявлять дефекты на готовых изделиях, сравнивая изображения с эталонными образцами. Также ИИ может анализировать исторические данные о дефектах и прогнозировать вероятность их появления в будущем, что позволяет планировать профилактические меры и предотвращать проблемы, а не просто реагировать на них.

Весомым преимуществом использования ИИ является: предоставление рекомендаций по отзыву. ИИ может анализировать данные о дефектах, чтобы оценивать риски для безопасности и рекомендовать, следует ли объявлять отзыв или нет; данные о производстве и продажах, чтобы определить количество автомобилей, которые должны

быть отозваны; может оптимизировать процесс отзыва, определяя оптимальный порядок действий и минимизируя негативные последствия для клиентов.

Как пример использования ИИ в автомобильном производстве можно рассмотреть следующие компании:

Ford: использует ИИ для автоматического обнаружения дефектов на кузовах автомобилей.

Tesla: использует ИИ для анализа данных о работе автомобилей, чтобы улучшать безопасность и автоматизированные функции.

General Motors: использует ИИ для создания умных систем мониторинга качества, которые могут прогнозировать проблемы и предотвращать дефекты.

Преимущества использования ИИ в системах мониторинга качества продукции:

1. Повышение точности: ИИ может выявлять дефекты с более высокой точностью, чем человек.
2. Ускорение процесса: ИИ может анализировать данные гораздо быстрее, чем человек.
3. Снижение затрат: ИИ может автоматизировать многие задачи, что снижает затраты на труд.
4. Улучшение качества продукции: ИИ может помочь выявлять и устранять проблемы с качеством продукции на ранней стадии.

Искусственный интеллект становится важным инструментом в системах мониторинга качества продукции в автомобильном производстве. Он позволяет автоматизировать многие задачи, увеличить точность обнаружения дефектов, снизить затраты и повысить качество продукции.

Важно отметить, что внедрение ИИ в производство – это сложный процесс, который требует соответствующей инфраструктуры, опытных специалистов и понимания особенностей конкретного производства.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 10393-2014 «Отзыв потребительских товаров. Руководство для поставщиков». М., 2014.

2. Сервисы сбора отзывов и комментариев на сайте: обзор // Сибирикс [Электронный ресурс] URL: https://blog.sibirix.ru/comment-services/ (дата обращения: 10.05.2024).

3. Палагин М. Искусственный интеллект трансформирует автобизнес. // Business Excellence. 2024. № 8. С. 104.

4. Козловский В.Н. Методология анализа и прогнозирования качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, А.В. Заятров // Актуальные проблемы экономики. 2016. Т. 186. № 12. С. 387-398.

5. Козловский В.Н. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1 / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 1. С. 40-49.

6. Козловский В.Н. Проблема стратегического планирования улучшения качества и надежности системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, А.В. Заятров // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 1. С. 44-47.

7. Panyukov D. Development and research FMEA expert team model / D. Panyukov, V. Kozlovsky, Y. Klochkov // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. 2020. Т. 27. № 5. С. 2040015.

8. Инновационные механизмы управления потенциалом сферы сервиса в регионе / Л.И. Ерохина, О.Н. Наумова, Л.С. Любохинец, В.П. Лещишена, О.В. Любохинец, Г.М. Кулапина, О.В. Маркова, Н.В. Никитина, И.А. Калашникова, В.Н. Дудко, Е.В. Мещерякова, В.Н. Козловский, С.Н. Цветкова, Т.В. Кретинина, Е.А. Бреусова, С.В. Фатеева, С.Н. Новоселов, Н.М. Ульяницкая, М.М. Шаблыкин, Г.А. Буряков и др. Тольятти, 2013.

9. Дебелов В.В. Моделирование электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости / В.В. Дебелов, В.В. Иванов, В.Н. Козловский, В.И. Строганов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 6. С. 2-7.

10. Козловский В.Н. Концепция методологии комплексной программы улучшений / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.В. Айдаров, Д.И. Панюков, Р.Д. Фарисов // Стандарты и качество. 2022. № 7. С. 36-42.

11. Строганов В.И. Математическое моделирование основных процессов электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин, Л.Х. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 7. С. 129-132.

12. Панюков Д.И. Новое руководство по FMEA: структурный анализ процессов / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2020. № 10. С. 36-42.

13. Козловский В.Н. Моделирование электронной системы VVT управления двигателем легкового автомобиля / В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 4. С. 5-12.

14. Козловский В.Н. Стратегическое планирование конкурентоспособности с точки зрения качества / В.Н. Козловский, С.А. Шанин, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2017. № 3. С. 76-80.

15. Дебелов В.В. Электронная система управления автомобиля "START-STOP" / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 2. С. 6-9.

Уразметова Диана Равилевна, аспирант, urazmetova.diana@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

IMPROVING TOOLS FOR ORGANIZING NEW VEHICLE RECALL CAMPAIGNS

D.R. Urazmetova

The article provides an overview of promising solutions aimed at increasing the effectiveness of recall campaigns, including the development of interactive customer communication platforms, the implementation of customer data management systems, the automation of quality monitoring processes, and the use of artificial intelligence to predict and prevent defects.

Key words: competitiveness; quality; automotive production; recall campaigns.

Urazmetova Diana Ravilevna, postgraduate, urazmetova.diana@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-149-150

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ РЕКЛАМАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В АВТОСБОРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

И.И. Хабибуллин

Рассмотрены вопросы основных проблем, современных инициатив и предложений по совершенствованию рекламационной деятельности.

Ключевые слова: конкурентоспособность; качество; автомобильная промышленность; рекламационная деятельность.

Рекламационная деятельность в автосборочном производстве является важным аспектом, обеспечивающим не только поддержку клиентов, но и сохранение репутации предприятия, улучшение качества продукции и повышения клиентской удовлетворенности. Непрерывный рост конкуренции на рынке автопрома, увеличение требований потребителей и изменения в законодательстве делают необходимым совершенствование существующих инструментов рекламационной деятельности [1].

Актуальность темы обусловлена тем, что успешная рекламация недостатков продукции не только помогает сохранить доверие клиентов, но и способствует получению обратной связи для улучшения производственных процессов. Это, в свою очередь, позволяет предприятиям расти и адаптироваться в условиях быстро меняющейся рыночной среды [2, 3].

Рекламация оформляется в письменном виде и должна включать информацию о наименовании товара, его количестве и месте нахождения, а также описание выявленных недостатков, которые стали основанием для подачи рекламации, вместе с требованиями по ее разрешению [4, 5]. Рекламация возможна в ситуациях, когда поставляется некачественная продукция, наблюдается несовпадение ассортимента, товар поставлен не в полном комплекте, изменилась цена, или если документы, предоставленные поставщиком, не соответствуют фактическим данным, касающимся поставки. Поставщик обязан рассмотреть поступившую рекламацию и в установленный контрактом срок ответить о своем согласии или отказе [6]. При этом он вправе проверить законность претензии, осмотрев товар. Все затраты, связанные с возвратом или заменой рекламационного товара, несет поставщик. Рекламация подается в следующих случаях: несоответствие качества товара условиям договора и стандартам, заказ товара недостаточного качества или комплектации, нарушения условий по количеству, а также изменение цен [7].

Претензии, предъявляемые покупателями продукции, напрямую зависят от брака, который может быть выявлен в следующих случаях: в процессе контроля, приемки продукции и в процессе производства. Каждый работник на производстве должен предотвратить продвижение и изготовление продукции с браком на последующие операции технологического процесса.

Основные проблемы в области рекламационной деятельности. Несмотря на наличие развитых систем рекламационной деятельности в большинстве автосборочных предприятий, существует ряд проблем, препятствующих их эффективному функционированию:

Недостаточная автоматизация процессов. Многие предприятия по-прежнему используют устаревшие методы обработки рекламаций, что увеличивает время реакции на претензии и снижает качество обслуживания клиентов.

Нехватка квалифицированного персонала. Отсутствие навыков у сотрудников отдела рекламаций негативно сказывается на их способности адекватно оценивать ситуацию и принимать верные решения.

Неэффективное взаимодействие между подразделениями. Часто информация о рекламациях передаётся между различными подразделениями с задержкой, что препятствует быстрому устранению проблем и снижает общую эффективность.

Недостаточное внимание к анализу данных. Большинство автосборочных предприятий недостаточно используют статистические данные для анализа рекламационной деятельности, что препятствует выявлению системных проблем в производстве [1, 8].

Современные инициативы в области рекламационной деятельности. Для улучшения рекламационной деятельности в автосборочном производстве многие компании начали внедрять современные инструменты и методы [9, 10]. Среди них:

Автоматизация обработки рекламаций. Внедрение специализированных программных решений позволяет ускорить процесс регистрации и обработки претензий, а также повысить уровень прозрачности этих процессов.

Обучение и повышение квалификации сотрудников. Разработанные программы обучения помогают повысить компетенции специалистов, занимающихся рекламациями, и формируют у них правильное понимание работы с клиентами [11].

Создание междисциплинарных команд. Формирование рабочих групп, состоящих из представителей различных подразделений (производства, качества, логистики и клиентского обслуживания) способствует более комплексному подходу к решению проблем [12, 13].

Для эффективной организации взаимодействия между подразделениями необходимо согласование общих целей, задач и ожиданий. Руководитель процесса обязан информировать о сроках и устанавливать четкие цели. Главной проблемой в сфере совместной работы подразделений является различие в приоритетах и ключевых показа-

телях эффективности их деятельности. В связи с этим следует создать реестр — документ, который будет описывать порядок выполнения задач, указывать исполнителей, а также фиксировать результаты каждой отдельной работы и всего процесса в целом. Мотивацию сотрудников следует осуществлять путем применения коэффициентов эффективности их работы и учета уровня их вовлеченности в выполнение процессов. Это позволит обеспечить быструю и гладкую реализацию бизнес-процессов.

Анализ данных и статистика. Использование методов анализа данных для выявления причин рекламаций позволяет создать более эффективные системы предупреждения и управления качеством.

Рекомендации по совершенствованию рекламационной деятельности.

Для дальнейшего улучшения рекламационной деятельности в автосборочном производстве можно предложить следующие рекомендации:

Внедрение современных технологий. Цифровизация процессов рекламации позволит увеличить скорость их обработки и снизить количество ошибок. Так, использование систем управления взаимоотношениями с клиентами (CRM) может значительно упростить работу с претензиями.

Регулярное обучение персонала. Проведение регулярных тренингов по теме рекламационной деятельности, управления конфликтами и обслуживания клиентов создаст базу для повышения эффективности работы сотрудников.

Введение на производствах влияние показателей качества на заработную плату (премирование) работников. Что в следствие ведет к повышению мотивации работников по выявлению брака.

Разработка системы обратной связи. Внедрение онлайн-платформ для получения обратной связи от клиентов позволит быстро выявлять проблемы и адаптироваться к потребностям потребителей.

Улучшение аналитики. Внедрение инструментов аналитики данных для мониторинга рекламационной деятельности даст возможность производителям не только реагировать на текущие проблемы, но и предсказывать потенциальные риски [2].

Участие клиентов в процессах улучшения. Создание форумов или опросов для клиентов, где они могут делиться своими мыслями о качестве продукции и обслуживания, позволит адаптировать бизнес-процессы под потребности клиентов.

Ключевыми аспектами совершенствования управления рекламационной деятельностью являются: оперативное и качественное устранение дефектов продукции и её компонентов, своевременное исследование неисправных изделий и их элементов с целью выявления причин неисправностей, повышение качества используемых материалов, а также усиление ответственности поставщиков за качество поставляемой продукции, подрядчиков – за качество выполненных работ, а потребителей – за соблюдение требований эксплуатации. Важно также увеличить ответственность всех организаций, задействованных в рекламационной деятельности, за выполнение требований технических условий, стандартов, контрактов, соглашений. В контексте управления рекламационной деятельностью это подразумевает принятие решений о дальнейших действиях с поставщиком, от которого был получен бракованный товар.

Совершенствование инструментов рекламационной деятельности в автосборочном производстве является важной задачей, которая требует комплексного подхода. Внедрение современных технологий, систематическое обучение персонала, улучшение взаимодействия между подразделениями и использование анализа данных помогут повысить эффективность работы с претензиями, улучшить качество продукции и укрепить доверие клиентов. В условиях активно развивающегося рынка эти аспекты становятся критически важными для успешного функционирования автосборочных предприятий.

Список литературы

1. Беляев, Эдуард Ирекович. Разработка проблемно-ориентированной системы для управления надежностью автомобилей на стадии гарантийного обслуживания: автореферат дис. кандидата технических наук : 05.13.01 / Беляев Эдуард Ирекович; [Место защиты: Ижев. гос. техн. ун-т]. Ижевск, 2012. 24 с.

2. Отдел рекламации: функции, этапы работы и KPI [Электронный ресурс] URL: https://sales-generator.ru/blog/otdel-reklamatsii (дата обращения: 01.10.2024).

3. Николаев П.А. Многофакторная оценка влияния дорожной обстановки на помехоустойчивость бортового электротехнического комплекса автомобилей / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорний, А.С. Саксонов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2022. № 1. С. 36-41.

4. Козловский В.Н. Математическая имитационная модель оценки зарядного баланса автомобиля / В.Н. Козловский, У.В. Брачунова, А.В. Крицкий, А.С. Саксонов // Грузовик. 2021. № 7. С. 17-26.

5. Николаев П.А. Оценка соответствия автомобилей требованиям помехоустойчивости к внешним электромагнитным воздействиям / П.А. Николаев, В.Н. Козловский, А.С. Подгорний // Грузовик. 2017. № 10. С. 44-48.

6. Козловский В.Н. Мониторинг удовлетворенности потребителей качеством автомобилей / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2016. № 6. С. 100-105.

7. Козловский В.Н. Цифровизация и проблемы трудовых коллективов: роли и ответственность / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.И. Панюков, Р.Р. Гафаров // Стандарты и качество. 2022. № 1. С. 94-98.

8. Панюков Д.И. Моделирование процедуры FMEA: анализ рисков / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 9. С. 34-43.

9. Козловский В.Н. Стратегическое планирование конкурентоспособности с точки зрения качества / В.Н. Козловский, С.А. Шанин, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2017. № 3. С. 76-80.

10. Дебелов В.В. Электронная система управления автомобиля "START-STOP" / В.В. Дебелов, В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 2. С. 6-9.

11. Kozlovskiy V. System of customer satisfaction monitoring by new cars in view of perceived quality / V. Kozlovskiy, D. Aydarov // Quality - Access to Success. 2017. Т. 18. № 161. С. 54-58.

12. Панюков Д.И. Формирование эффективной FMEA-команды / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, С.А. Шанин // Стандарты и качество. 2017. № 7. С. 68-72.

13. Kozlovsky V.N. Calculation and statistical experiment on the monte carlo method when assessing the stability of the technical characteristics of the automobile generator set in mass production / V.N. Kozlovsky, V.E. Lysov, V.V. Er-

makov, D.V. Antipov, D.F. Skripnuk // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. 2019. С. 565-568.

Хабибуллин Ильшат Илхамович, аспирант, temniy2001@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

IMPROVEMENT OF TOOLS FOR ORGANIZING COMPLAINT ACTIVITIES IN AUTOMOBILE ASSEMBLY PRODUCTION

I.I. Khabibullin

The article considers the issues of the main problems, modern initiatives and proposals for improving complaint activities.

Key words: competitiveness; quality; automobile industry; complaint activities.

Khabibullin Ilshat Ilhamovich, postgraduate, temniy2001@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-151-152

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА АВТОПРОИЗВОДИТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ СОЗДАНИЯ ПРОМСБОРКИ

А.С. Клентак

В работе представлены предложения по развитию системы менеджмента качества автопроизводителя в условиях создания предприятия по промсборке автомобилей.

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, система менеджмента качества, автомобильное производство, промсборка.

Создание и развитие предприятия по промсборке автомобилей, является процессом, связанным со стратегическим развитием автопроизводителя [1]. Обеспечение конкурентоспособности продукции, производимой на предприятии промсборки напрямую зависит от эффективности реализации стандартов автопроизводителя по всем основным направлениям деятельности, начиная с закупок и поставок автомобильных компонентов и машинокомплектов, заканчивая обеспечением обслуживания на предприятиях фирменной сервисной сети [2, 3]. То есть связь между стратегией развития и системными аспектами управления качеством прямая (рисунок 1).



Рис. 1. Графическая интерпретация связей между стратегией развития автопроизводителя и управления качеством процессов, продуктов и услуг

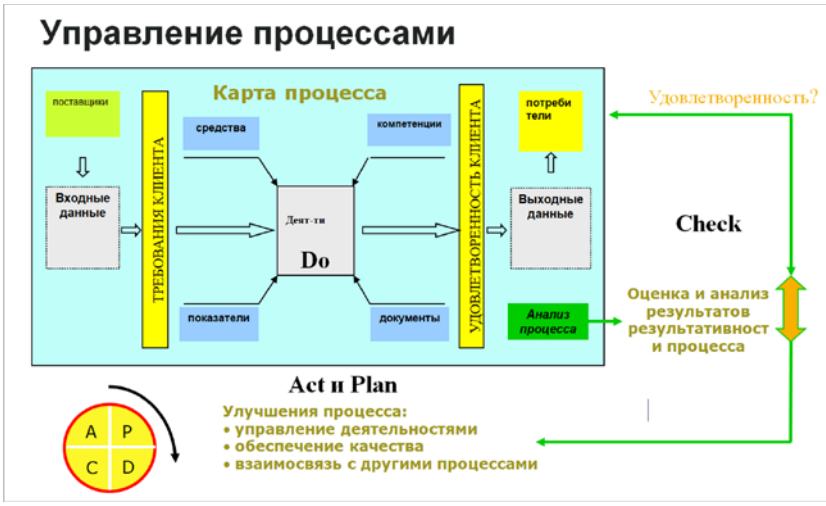


Рис. 2. Представление процесса системы менеджмента качества в виде цикла Э. Деминга

Система менеджмента автосборочного предприятия представляется в виде совокупности процессов, интерпретация которых в рамках цикла Э. Деминга (рисунок 2), дает четкое представление об основных функциях управления качеством в организации [4].

Представляется, что принятие стратегического решения о создании и развитии промсборки, должно сопровождаться расширением дорожной карты процессов системы менеджмента качества автопроизводителя, как это представлено на рисунке 3, в виде процесса действующего на уровне управления [5, 6].

В настоящее время, высокую значимость в системе процессов приобретает деятельность, обеспечивающая информационную эффективность, связь и развитие инструментов цифровизации [7]. Считаем, что модернизация карты процессов должна включать в себя и создание соответствующих процессов поддержки (рисунок 3).

Развитие системы менеджмента качества автопроизводителя при реализации программ по промсборке продукции повышает роль корпоративной службы качества автопроизводителя и определяет необходимость создания структуры и параметров взаимодействия подразделений представляющих интересы потребителей на новых производственных площадках [8, 9].

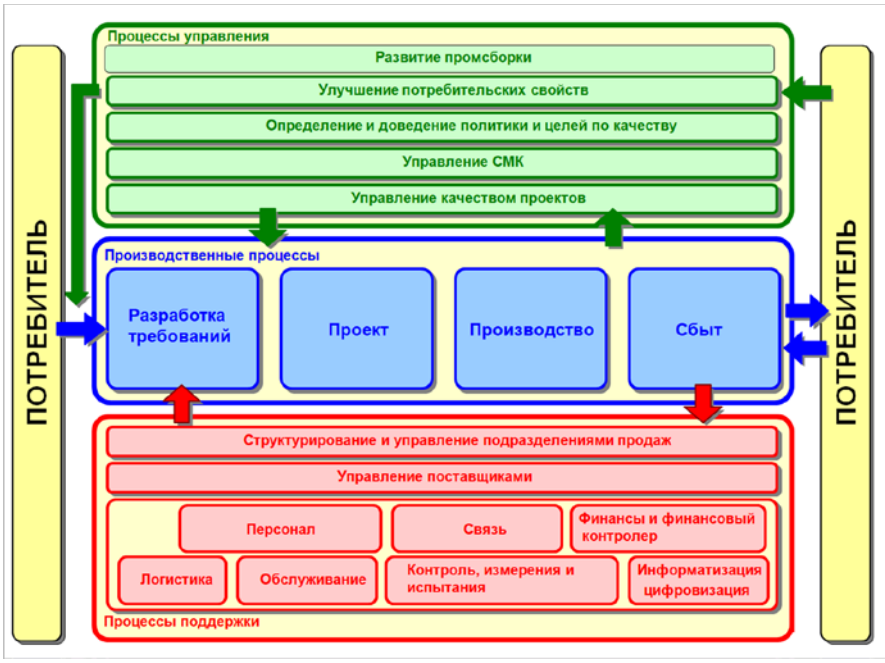


Рис. 3. Графическая интерпретация предложения по развитию СМК автопроизводителя, при реализации стратегии связанной с созданием предприятий промсборки

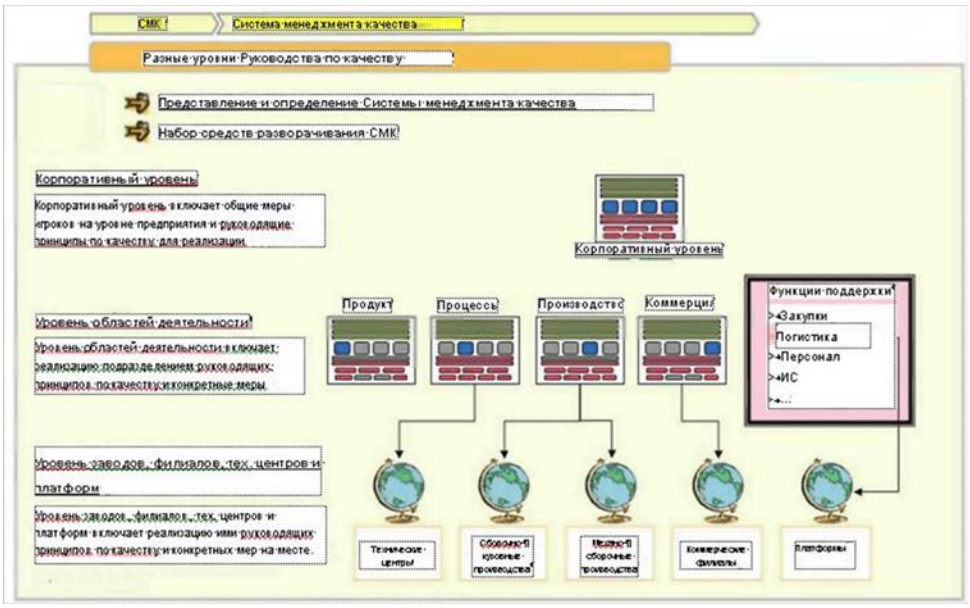


Рис. 4. Графическая интерпретация связей между корпоративной СМК автопроизводителя и системы менеджмента предприятий промсборки

Логика связей между корпоративной системой менеджмента и СМК промсборки можно проследить с использованием данных представленных на рисунке 4. Здесь, хорошо видно, что корпоративный уровень системы менеджмента определяет руководящие принципы по качеству и общие меры по их обеспечению [10]. Далее на уровне

областей деятельности осуществляется классификация процессов с обеспечением соответствующей связки с процессами, действующими на уровне промсборки в различных географических регионах присутствия автопроизводителя [11, 12].

Исходя из выделенных аспектов организации корпоративной системы менеджмента автопроизводителя, с учетом необходимости обеспечения связи корпоративной системы менеджмента и СМК промсборки можно выделить роль подразделений службы качества на производственной площадке в виде следующих обязательств: развивать, продвигать и гарантировать внедрение системы качества автопроизводителя, позволяющей предприятию достичь желаемый уровень качества; определить «План качества продукции» предприятия и управлять общими планами действий; обеспечить качество разработки проектов, гарантируя, что каждый узел или автомобиль, предназначенный для продажи в какой-то стране, будет соответствовать контрактным целям качества (удовлетворение ожиданий клиента, строгое соответствие требованиям); регулярно оценивать исполнение проектов и извещать высшее руководство об отклонениях; разрешать переход ключевого события по качеству (в другое состояние); убедиться, что все правила и процедуры СМК соблюдены во всем предприятии и предложить соответствующие улучшения; строго соблюдать комплекс деятельности в области омологации продукции; способствовать постоянному улучшению процессов индустриально-техническому периметру (сектору) автопроизводителя для обеспечения соответствия продукции техническим и нормативным требованиям; оценивать серийное качество, обеспечивая контроль уровня качества продукции и ее соответствия нормативным требованиям на выходе с заводов и при поставке в дилерскую сеть; обеспечивать поддержку международной дирекции по качеству и дирекции страны в их деятельности по проектам и продуктам [13 – 15].

Трансляция процессов системы менеджмента автопроизводителя в СМК предприятия промсборки осуществляется в соответствии с основными функциями предприятия и соответствующих задач службы качества, о которых сказано выше [16, 17]. Графическая структура системы процессов предприятия промсборки представлена на рисунке 5.

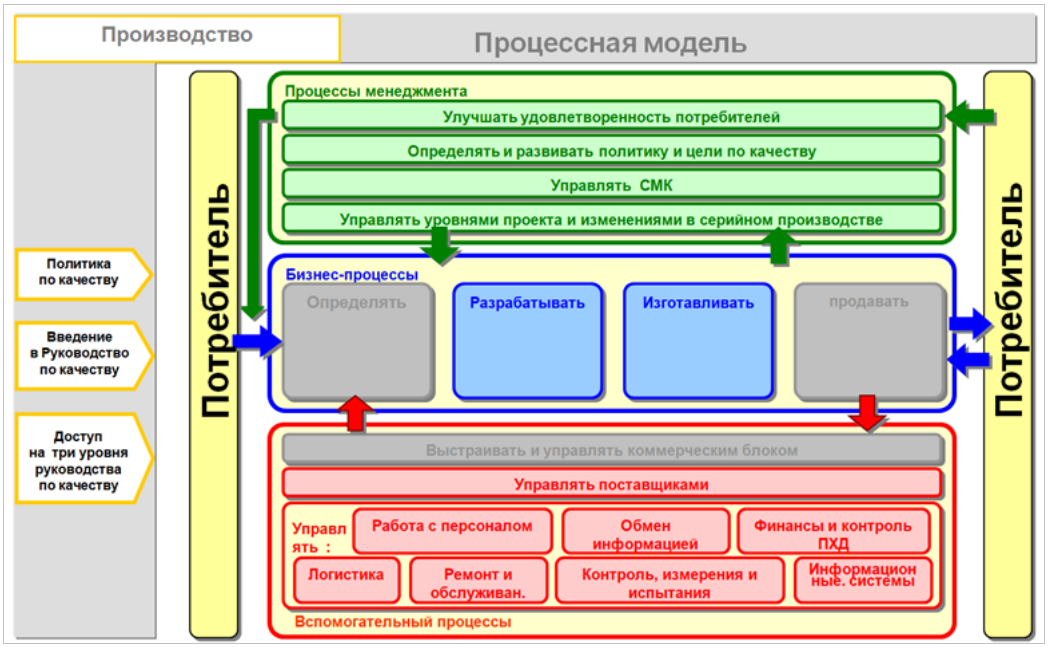


Рис. 5. Предложение по разработке СМК предприятия по промсборке автомобилей

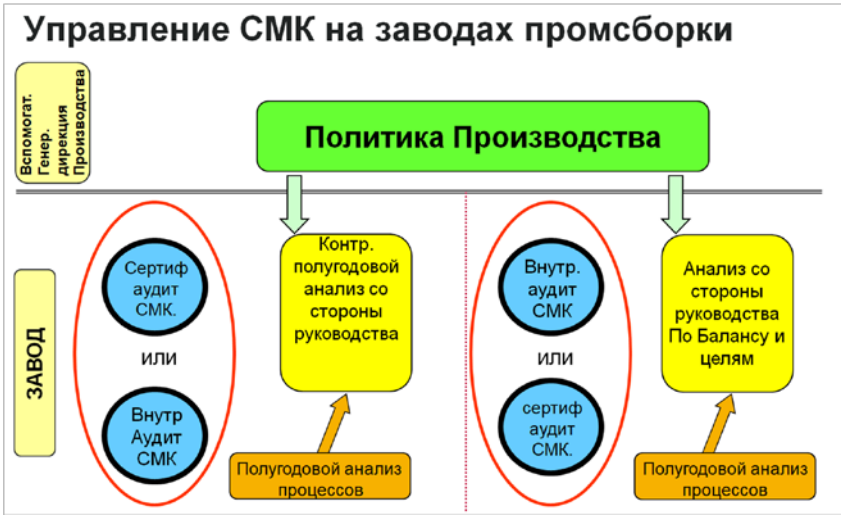


Рис. 6. Управление СМК промсборки

Предложенная модель СМК (рисунок 5), в сравнении с моделью корпоративной СМК автопроизводителя несет существенные отличия в части организации бизнес-процессов: предприятие промсборки не реализует процессы связанные с определением (разработкой) требований к продукции; не осуществляет продажи продукции. В части вспомогательных процессов, СМК автосборки не содержит процесса коммерческого управления. Соответствующие процессы бизнеса и поддержки должны быть реализованы на уровне корпоративной СМК автопроизводителя [18, 19].

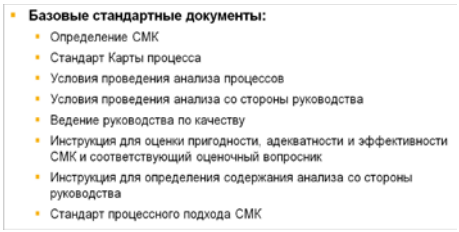
Исходя из вышеизложенного процесс управления СМК на предприятия промсборки может быть представлен в виде графической структуры (рисунок 6), и как видно из рисунка такое управление находится в двух плоскостях: контрольный полугодовой анализ СМК со стороны руководства; анализ со стороны руководства по балансу и достижению целей [20, 21].

Карта процесса «Управление СМК промборки» представлена на рисунке 7 и включает основные разделы определяющие: входные и выходные данные процесса; поставщиков и потребителей; базовую документацию и показатели процесса; ожидания потребителей и определение взаимосвязей с другими процессами.

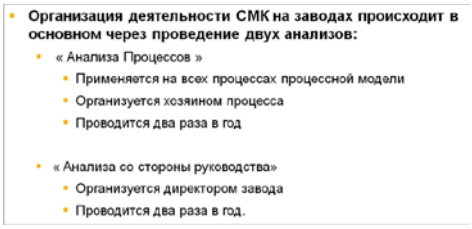
Наименование процесса: «**Управлять Системой менеджментом качества»**		**Хозяин: Ф.И. хозяина процесса (Владелец карты процесса)**		
Техническое средство		**Персонал/ квалификации**		
Инструменты по ИС, обмену информации и сайты внутрен.сети		**Хозяин процесса, координатор, организатор по направлению, аудитор; Управление инструментами и работай по качеству СМК, серия обучения и квалификации**		
Поставщик	**Входные данные**	**Деятельности процесса**	**Выходные данные**	**Потребители**
Дирекция по качеству и другие Дирекции по качеству процесс: Определить и развернуть политику и цели по качеству»	**СМК Политика по качеству подразделения План качества подразделения Цели по качеству подразделения**	**1- Внедрить и поддерживать в раб.состоянии) систему по качеству**	**Документы фонда СМК (процес.модель, РК и т.д.)**	
Внешн.: Дирекции и сертифиц.органы Внутр.:CSQ и CPU Хозяева процессов	**Графики контроля СМК Результаты контроля СМК(аудиты) Результаты и ПКД по результатам анализа процессов и анализа со стороны руководства**	**2- Измерять, анализировать результативность Системы качества**	**Отчеты аудитов Отчеты управления СМК Оценка системы качества**	**хозяева процессов ДпК и ДпК**
Дирекция по качеству Дирекция по качеству процесс «Определить и развернуть политику и цели оп качеству	**Отклонения по результатам аудитов в производстве Элементы капитализации Действия принятые во время последнего анализа со стороны руководства**	**3 – Определять и управлять ПКД и планами улучшений по системе Качества**	**Определенные и управляемые ПКД Система качества в постоянном совершенствовании**	
Базовая документация	**Показатели**			
	Управления процессом		**Результата**	
Руководство качества производства с базовыми документами, которые здесь указаны,	**1- Кол-во представленных документов/кол-во стандарт. Документов Управление СМК (% выполнения совещаний,% присутствия на совещаниях) 2- %выполнения аудитов №3 и№4 3-% валидации в срок действий по результатам аудитов СМК % закрытия отклонений по результатам аудитов №4 (вне СМК) в срок.**		**1- Кол-во несоответствий на объем документации во время аудитов СМК 2- Кол-во сохраненных несоответствий во время аудитов СМК 3- оценка соответствия/ адекватности/результативности (радар СМК) Общий показатель СМК (в построении)**	
Ожидания потребителей	**Взаимосвязи с другими процессами**			
Иметь систему качества: соответствующую, адекватную и результативную в постоянном улучшении. Иметь СМК соответствующую стандартам.	**Данный процесс связан со всеми процессами процессной модели**			

Рис. 7. Карта процесса – «Управлять СМК промсборки»

Структура базовой нормативно-технической документации предприятия промсборки должна включать разделы в соответствии с данными рисунка 8 а. Вопросы организации деятельности в системе менеджмента качества представлены на рисунке 8 б. Основные аспекты организации процесса анализа модели СМК предложены на рисунке 8 в.



а



б



в

Рис. 8. К вопросам организации СМК предприятия промсборки

Сводная таблица процесса «Управлять СМК промсборки» (рисунок 9) содержит основные показатели отражающие состояние системы менеджмента, через которые предлагается проводить мониторинг.

Сводная таблица процесса «Управлять СМК»

Деятельности процесса	Гр.	симв	трен	Показатели – Состояние на …	Тип
Внедрить и поддерживать систему качества	1	☺	⇨	Кол-во представленных документов/ кол-во стандартных документов	Управление
	2	☺	⇨	Управление СМК(Процент проведения совещаний)	Управление
	3	☺	↘	Управление СМК(Процент присутствия на совещаниях)	Управление
	4	☺	⇨	Кол-во несоответствий на документальный объем во время аудитов СМК	Результат
Измерять, анализировать результативность системы качества	5	😐	↗	Уровень выполнения аудитов № 3 и 4	Управление
	6	☺	⇨	Кол-во оставленных несоответствий во время аудитов СМК	Результат
Определять и управлять планы корректирующих действий и постоянного улучшения в системе качества	7	☺	⇨	Процент валидации в срок действий, произошедших от аудитов СМК	Управление
	8	☺	⇨	Процент закрытия отклонений аудитов №4 (вне СМК) в срок	Управление
	9	☺	⇨	Общий показатель СМК	Результат
	10	😐	↗	Оценка соответствия/адекватности/ результативности (Радар СМК)	Результат
ПРОЦЕСС	11	☺	↗	Процент показателей для принятия обязательств в Карту процесса (результат процесса)	Результат
Результат < для принятия обязательств		☹	↘	Результат снижается	
Результат >=для принятия обязательств < к цели		😐	⇨	Результат постоянный	
Результат >=к цели		☻	↗	Результат повышается	
(*)означает несоответствие обнаруженное на аудите № 1 и снова обнаруженное на аудите №					

Рис. 9. Сводная таблица процесса «Управлять СМК промсборки»

Таблица оценки пригодности, адекватности и результативности СМК

Критерии оценки			Уровни результативности				
			Базовая деятельность	Определять,план.-ть,контрол управлять		оптимизировать	Пост.улучшать
Пригодность СМК (адекватность по отношению к требованиям потребителей и заинтересованных сторон							
	Удовлетворен-ть потребителей	Ориентация на клиентов	Завод не учитывает все Потребности и ожидания клиентов В своей работе.	Завод знает потребности и ожидания своих клиентов, но не переводит их всех в конкретные требования	Завод убеждается, что потребности и ожидания клиентов выражены конкретно в рамках требований	Завод показывает новшества для опережения будущих потребностей не выраженных его клиентами.	Завод приглашает к участию своих клиентов в разработке своей политики и стратегии
		Оценка удовлет-ти	Внедряемые приемы направлены на реализацию продукции согласно обычным приемам завода	Процессы стремятся к соответствию явным и неявным требованиям клиентов	Процессы нацелены на удовлетворенность клиентов	Процессы нацелены на постоянство удовлетворенности клиентов.	Удовлет-ть участвующ сторон поддерживается на уровне определ. стратегией завода
		рекламации	Анализ жалоб и реализация планов действий не имеют определ. структуру и не отслеживаются	Организация анализирует жалобы и внедряет соответств.планы действий способные удовлетворить клиента	Система обрабатывает все жалобы. Эффект.коррект.действия ведутся приоритетно с необход.средствами. Жалобы уменьшились.	Рекламации приходят в дополнитель исследованиям, кот.приводят к разраб не плана действий. Практически нет больше жалоб клиентов	Клиенту удовлет-ти выполнены планы действий определяются по результатам этих оцнет. Клиенты удовлетворены и преданны
	аудиты качеству	планирование и пригодность	График составлен в зависимости от свободных ресурсов. Соответствие не измеряется	График охватывает всю деят-ть и внедрены необходимые ресурсы. Оценка соответствия аудитов базируется только на суждениях аудиторов.	График аудито учитывает результаты предыдущих аудитов. Имеется система (инструмент + частота) для оценки соответствия аудитов	Периодичность аудитов оптимизирова Оценено соответствие и результаты служат базой для разработки следующих графиков аудитов	Аудиты охватывают систему качества, процессы, продукцию. Можно оценить соответствие аудитов в финансовом выражении
		Результаты и реактивность	Результаты начинают планы действий несоответствующих /неполных, без особого контроля	Результаты анализируются. Обобщен. итог аудитов является одним из инструментов дирекции.	Результаты соответствуют установлен целям, аудиты нацелены на слабые места	Аудиты поняты всеми и используются как инструмент прогресса	Результаты показывают,что завод находится среди лучших. Аудиты Используются как инструменты определения
	система качества	организация, документация	Система качество находится на внедрении базовых приемов компетентным персоналом.	Базовые приемы докум.оформлены, известны персонлов, и эффективно внедрены	Базов.приемы адаптированых к особенностям обстановки (клиент, продукт) внедрены эффективно.	Система качество адаптированная к обстановке и оптимиз-ная внедрена	Система качество внедренная постоянно адаптируется для Поддержания на оптимуме. (конкуренты, рынок..)
		Управление рисков	Риски не идентифицируются документально. Они определяются по интуиции	Существует формальная оценка рисков (FMEA, Карта риска..)	Риски управляются, не обнаруживаются Значительные неполадки	Анализ рисками интегрирован и регулярно обновляется	Управление рисками развито и работает
		управление взаимосвязей	Взаимосвязи не идентифицируются, их управление базируется на индивидуальных усилиях.	Координация взаимосвязей организована формально	Взаимосвязи работают хорошо и неполадки редкие и малозначительн.	Управление взаимосвязями постоянно анализируется с клиентами и поставщиками процессов.	Внутрен.отношение клиент-поставщик оцениваются и считается очень Удовлетворительным
	планирование качества (улучшение)	Политика	Политика по качеству документально не оформлена, ни сообщена.	Политика качества нацелена на соответствие продукции	Разные уровни управления вовлечены в развертывании политики качества	Политика по кач-ву нацелена на длите удовл-ть различн.участ. сторон завода (Клиент, персонал, акционеры..)	Политика по качеству -элемент стратегического управления завода
		Перспек.и стратегич.план	Прогрессивный план главным образом относится к продукции	Завод определяет перспективн.план по продукции и соответствующим Критическим процессам.	Завод определяет действия по качеств для достижения удовлет-ти клиентов	Перспект.план направленна удовлетворенность клиентов улучшение результатов	Перспект.план показывает постоянное улучшение результатов на всех уровнях
Адекватность СМК (адаптация ресурсов по отношению к определенным целям)							
	управление ресурсов (людских, материальных И финансовых)	планирование	Выделение ресурсов не запланирован ,а отвечает запросам.	Ресурсы выделяются в процессы по предварит. установленным бюам	Ресурсы планируются и управляются для достижения целей по качеству И удовлетворености клиентов	Потребности в ресурсах опережают их учет оптимизирован	Планирование всех ресурсов распределяется исходя с Политики и стратегии завода
	Людские ресурсы	Развитие компетенций	Назначение людей не управляется Полномочия передаются на словах	Сетка полномочий определена .	Потребности в квалификациях постоянно анализируются согласно развитию завода.	Управление полномочиями позволяет улучшить результативность персонала (взаимозаменяемость, экспертиза..)	Управление компетенциями соединяется с управлением карьер.роста и поддерживает новшества завода
		Накопление опыта	Производственное мастерство базируется только на отдел.личностях	Существует док.оформленная капитализация знаний	Система позволяет распределять знания	база знаний актуализируется постоянно и обогощается возвратом опыта	Умение обогощается лучшим передовым опытом на рынке .
Результативность СМК (уровень выполнения запланированных работ и достижение запланир.результатов)							
	Результаты и постоянное улучшение	Достижение результатов	Результаты не стабилизированы, а носят случайный характер.	Результаты растут	Результаты соответствуют определенным целям	Несоответствия процессов исчезли	Цели достигаются и отмечают постоянное улучшение достигнутых результатов
		Постоян.улучшение	Улучшения касаются только продукции	Улучшения касаются продукции и процессов	Действия по улучшению продукции и процессов взяты в работу на уровне дирекции	Действия по улучшению продукции и процессов развернуты и взяты в работу на всех уровнях завода	Весь персонал вовлечен в разработке и внедрении действий по улучшению. Менеджмент берет на себя ведение основных действий по улучшению с вовлечением всего персонала.
	результативность плана действий	анализ	Причины сбоев анализируются не систематично	Причины сбоев анализируются и запускают корректирующие действия	Анализ запускает предупреждающие действия	Анализ проводится до запуска новых систем или значительных изменений	Анализ учитывает разработку систем управления, процессов и продукции
		действия	Корректир. действия определяются несистематично	Корректирующие действия устраняют риск повт.появления неисправностей.	Предупреждающие действия Эффективно внедрены	Корректир. и предупреждействия уменьшаются на всех уровнях.	Предупреждающие действия систематически применяются.
		результативность	Встречаются повторяющиеся несоответствия	Редко встречаются повторяющиеся несоответствия.	Известн. несоответствия уменьшаются но существуют случайные несоответствия	Коррект.и предупрежд.действия интегрированы и искореняют несоответствия	Ни одного нового несоответствия Не было обнаружено.

Рис. 10. Таблица оценки пригодности, адекватности и результативности СМК промсборки

На рисунке 10 представлена таблица оценки пригодности, адекватности и результативности СМК, в рамках которой проводится трансформация корпоративных критериев оценки качества в критерии действующие в СМК предприятия промсборки. Соответствующая трансформация осуществляется по уровням результативности.

Цели и задачи анализа со стороны руководства (рисунок 11) заключаются в том чтобы убедиться, что СМК – пригодная, адекватная и результативная исходя из результативности каждого процесса, цели предприятия промсборки достигнуты в соответствии с Политикой по качеству, а также обеспечить улучшение системы и определить соответствующий план действий.

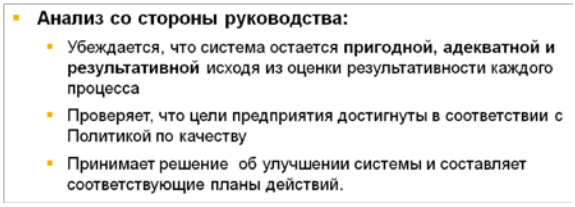


Рис. 11. Цели и задачи анализа со стороны руководства

Мониторинг состояния СМК проводится с помощью обобщенного показателя 9 (рис. 12), который образует общий показатель системы менеджмента, как среднее арифметическое значение по всем показателям с 1 по 8. Графически процесс мониторинга обобщенного показателя СМК можно представить в виде блок-схемы (рис. 10).

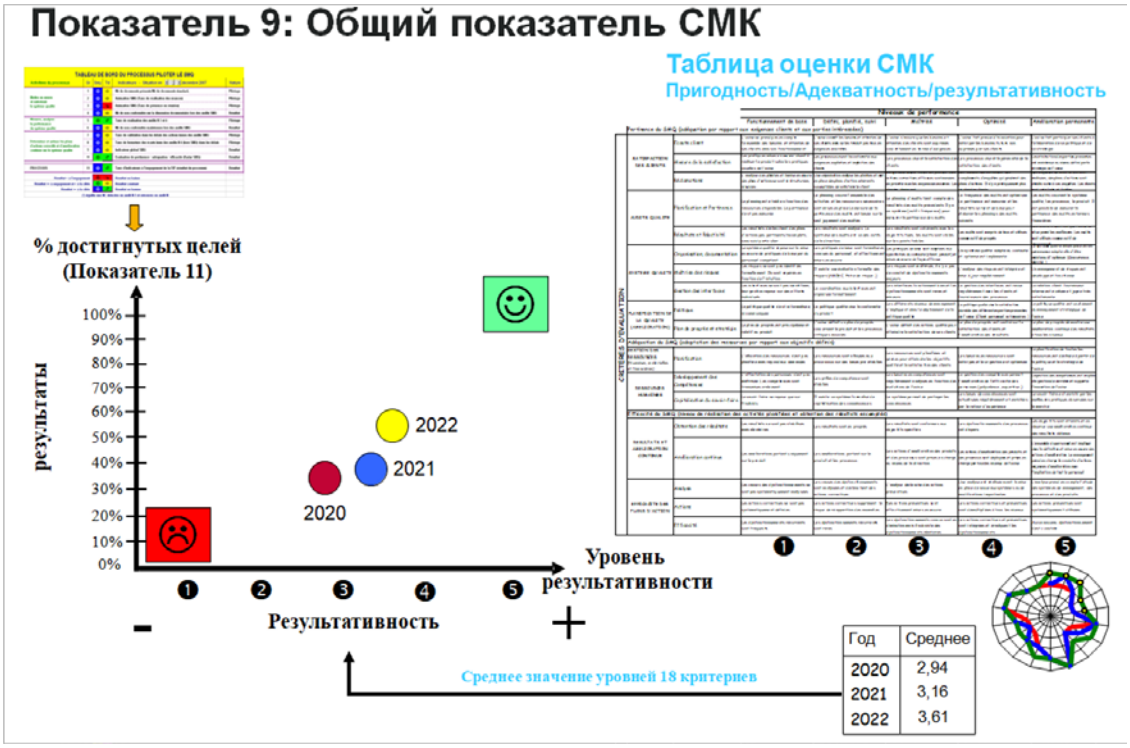


Рис. 12. Мониторинг общего показателя СМК предприятия промсборки

Таким образом, система менеджмента промсборки автомобилей обеспечивает развитие одного конкретного предприятия, а совокупность таких систем, действующих на разных промышленных площадках создает предпосылки для развития СМК всех предприятий промсборки автопроизводителя и влияет на корпоративную систему менеджмента. И, если, к данному вопросу подходить с позиции идеологии процессного управления, то получается что постоянное улучшение в системах менеджмента предприятий промсборки обеспечивает интегральное улучшение корпоративного уровня компании автопроизводителя (рисунок 13).

Показатель 10 (рисунок 14) дает оценку результативности СМК промсборки. По сути, данный показатель представляет собой радар или лепестковую диаграмму отражающую оценку деятельности в системе менеджмента качества по всем индикаторам, представленным в таблице 10.

Таким образом, нами предложены системные инструменты составляющие основу менеджмента качества предприятия промсборки автопроизводителя. Показано формирование корпоративной системы менеджмента, системы менеджмента просборки, определены связи между уровнями СМК. Предложена карта управления системой менеджмента промсборки. Обоснованы индикаторы пригодности, адекватности и результативности СМК промсборки. Показан процесс мониторинга системы менеджмента промсборки одного и нескольких предприятий. Предложено рассматривать оценку результативности предприятий с помощью графического радара (лепестковой диаграммы).

В соответствии с предложенным выше, рассмотрим процесс формирования функционала дирекции по качеству предприятия промсборки.

Основные связи и функции директора по качеству предприятия промсборки, могут быть представлены в виде графической структуры (рисунок 15).

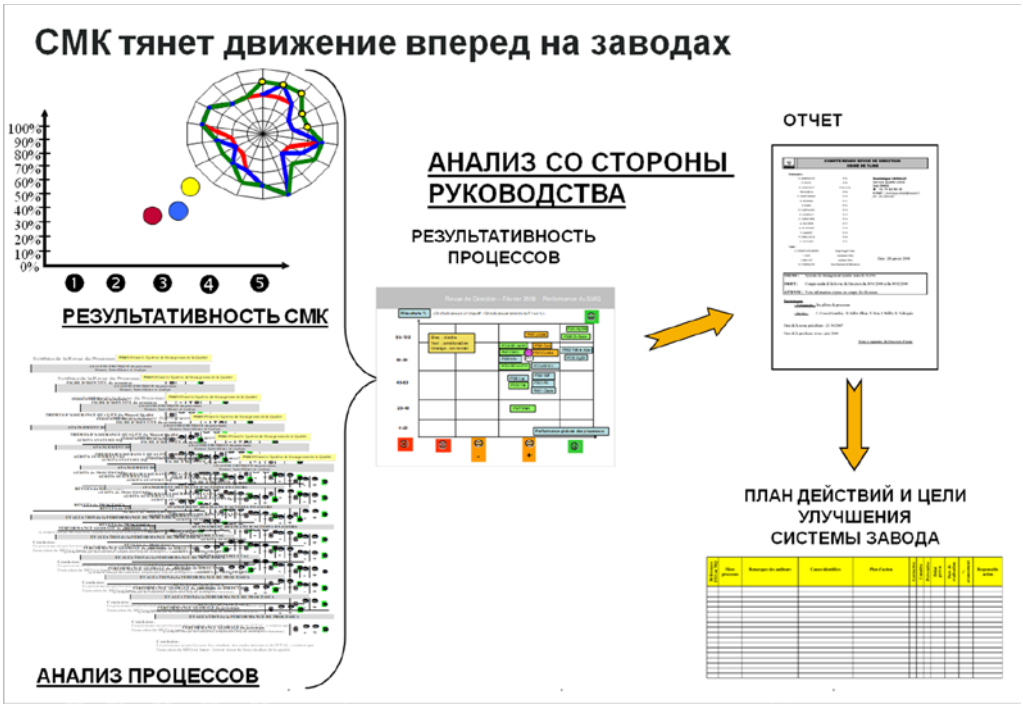


Рис. 13. Графическая интерпретация процесса постоянного улучшения на предприятиях промсборки автопроизводителя



Рис. 14. Распределение показателей, отражающих результативности, пригодность и адекватность СМК предприятия промсборки

Исходя из перечня обязательств дирекции по качеству предприятия промсборки, сформулируем перечень обязанностей директора по качеству:

1) Обеспечение выполнения основных задач службы качества:

- определение и реализация системы управления качеством автопроизводителя;

- обеспечение соблюдения стандартов и реализации процессов качества, в частности за счет аудита;
- контроль за деятельностью менеджеров по разработке планов повышения качества и выполнению показателей плана качества;
- заключение договоров по показателям качества в случае делегирования полномочий корпоративным директором по качеству;
- оценка плана качества для страны и соответствующего бюджета;
- мониторинг расходов по гарантии.

2) Управление планом улучшений:
- качество проектирования;
- производство без несоответствий;
- повышение всесторонней надежности и долговечности;
- обеспечение удовлетворенности потребителя продукцией и сервисом;
- укрепление качества в компании и культуре.

3) Информирование генерального директора в стране о результатах по качеству (кампании по отзыву и сервису, качество продукции, качество сервиса и тд.), распространение информации по качеству от корпоративной службы качества.

4) Информирование корпоративной службы качества о местных результатах по качеству (оценочные карточки), руководство комитетом по качеству, включая глобальные функции.

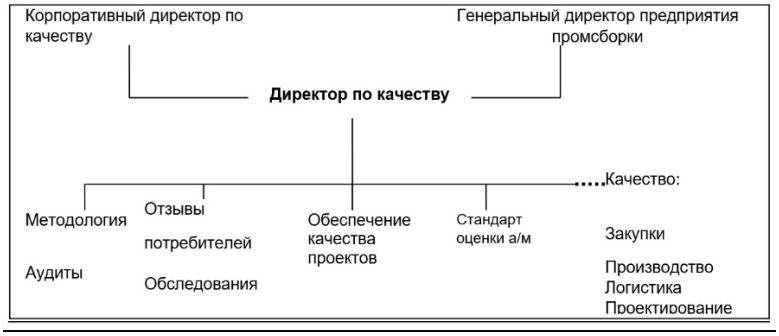


Рис. 15. Структура взаимодействия и функционал директора по качеству предприятия промсборки

Права директора по качеству: приостановление действия договора по показателям качества или задержание партии или отгрузки; доступ ко всей необходимой информации; запрос третейского решения управленческого комитета региона при необходимости; членство в управленческом комитете; членство в корпоративном комитете службы качества и участие в его заседаниях.

Роли, ответственность, функционал, в рамках действующей СМК предприятия промсбрки, должны быть распределены так как это предложено на рисунке 16.

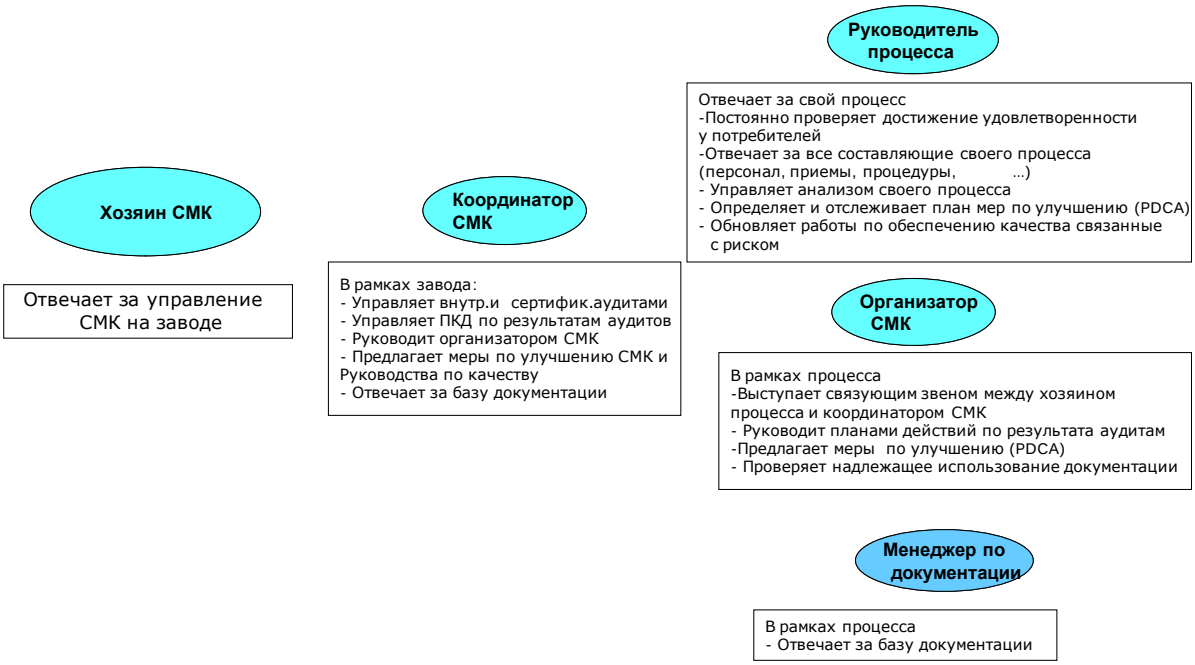


Рис. 16. Роли, ответственность, функционал в рамках СМК предприятия промсборки

Предлагаемая структура дирекции по качеству действующая на предприятии промсборки автомобилей представлена на рисунке 17, разделена по функциональным блокам ответственности за деятельность направленную на управление качеством в производстве, закупках, в проектах, поставках и собственно в системе менеджмента.

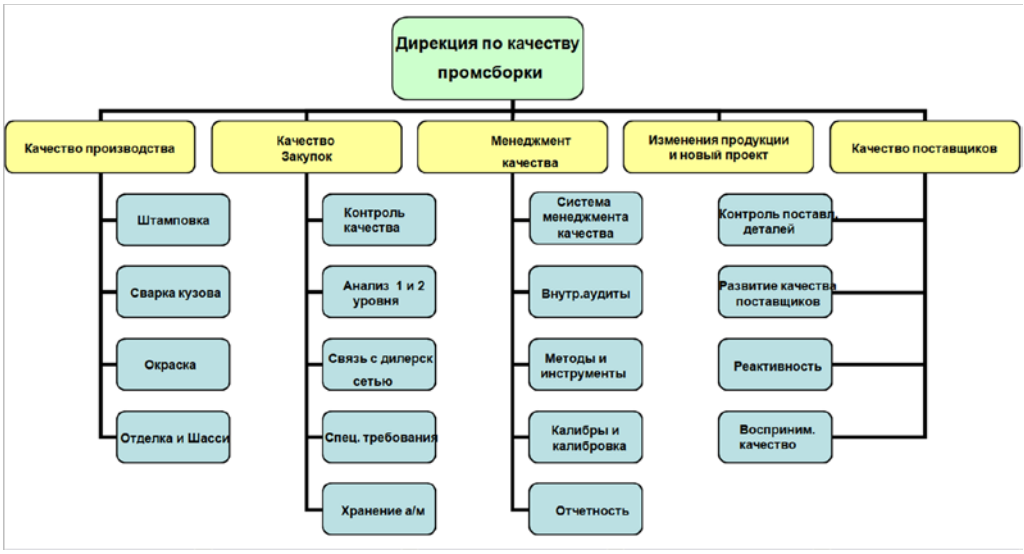


Рис. 17. Предлагаемая структура СМК предприятия промсборки автомобилей, выделенная по основным функциям

Эффективность реализации стратегических целей автороизводителя, которые выражаются в развитии предприятий промсборки, напрямую зависит от соответствующей эффективности действующей системы направленной на изучение конкурентоспособности продукции на новых рынках. Получается, что автопроизводитель, прежде чем производить высокозатратные инвестиции в создание предприятия по сборке определенной продукции, должен достаточно четко представлять: на какой конкурентный рынок выходит его продукция; каким должно быть качество продукции на новом рынке для того чтобы обеспечить удовлетворенность потребителей. Чтобы наиболее полно и точно ответить на поставленные сложные вопросы, автопроизводитель должен иметь в своей корпоративной структуре, подразделения, отвечающие за проведение исследований конкурентоспособности продукции на рынке, в том числе международном, с позиций качества продукта. Получается, что традиционное видение функций корпоративной дирекции по качеству автопроизводителя, в случае стратегического развития компании и создания предприятий по промсборке продукции должно существенно расширяться вместе с развитием поля деятельности автопроизводителя.

В любом случае, организация работы компании автопроизводителя в части развития корпоративной службы качества должна соответствовать предложенной на рисунке 18 структуре.



Рис. 18. Графическая интерпретация предложения по развитию функций корпоративной дирекции по качеству автопроизводителя

Исходя из предложенной структуры (рисунок 18) вытекает, что для обеспечения деятельности подразделений занимающихся оценкой качества продукции и удовлетворенности потребителей на международных рынках требуется методологическое сопровождение и набор инструментов действующих как внутри автомобильной корпорации – внутренних инструментов, так и инструментов универсальных, применяемых международными экспертными институтами, институтами технического маркетинга автомобильной техники и собственно автопроизводителями, для проведения исследований в области оценки качества продукции и удовлетворенности потребителей.

При создании предприятий промсборки автопроизводителя, процесс выделения наиболее острых проблем качества продукции на новом рынке присутствия должен быть непродолжительным, а процесс устранения этих недостатков – стремительным. Только таким образом можно обеспечить конкурентоспособность автопроизводителей на новых рынках присутствия. И здесь уже на первых этапах, необходимо правильно распределить роли связанные с улучшением качества. Если, процесс исследования продукции на новых рынках реализуется корпоративной дирекцией в рамках соответствующего процесса автопроизводителя, то улучшение конструкции продукции может быть реализовано непосредственно на предприятии просборки, особенно этот аспект выделяется в случае если выделенные недостатки качества являются специфическими, характерными для определенного потребительского рынка. Скажем, что есть целый ряд показательных примеров в этой области, когда отечественные автопроизводители не

достаточно полно учитывали особенности перспективных рынков. В первом примере, один из ведущих автопроизводителей, осваивая рынки ближнего востока, не в полной мере учел климатические особенности сухой высокотемпературной погоды и это привело к массовым проблемам перегрева двигателя внутреннего сгорания. В другом случае, выход на промсборку автомобилей популярной отечественной марки, на предприятии расположенном в географической близости к экватору и соответствующему рынку сбыта, с очень высокой влажностью воздуха привел, к эксплуатационным проблемам автомобилей связанным с коррозионной стойкостью кузова. Также можно привести пример, когда один из крупнейших отечественных автопроизводителей при создании промборки в южных странах, разрабатывая инструменты доставки машинокомплектов, не достаточно полно рассмотрел особенности морской доставки грузов, были допущены серьезные упущения. Результатом чего стала потеря товарного вида лицевых панелей, кузовных деталей и пр. в следствии воздействия солевого тумана.

В общем, несмотря на специфику и тщательно скрываемую информацию о потерях имиджа и качества продукции на новых рынках при упущениях в процессе создания промсборки, подобного рода примеры не уникальны. А решение проблемных вопросов в области качества автомобилей промсборки, на новых рынках сбыта напрямую зависит от качества проведения исследований конкурентоспособности и удовлетворенности потребителей качеством продукции. Именно это обеспечивает качество процесса омологации, с подготовкой продукции ориентированной под запросы конкретного рынка.

Список литературы

1. Козловский В.Н. Моделирование электрооборудования автомобилей в процессах проектирования и производства: монография. Тольятти, 2009.

2. Козловский В.Н. Надежность системы электрооборудования легкового автомобиля / В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. 2008. № 3. С. 37-40.

3. Панюков Д.И., Козловский В.Н. Фундаментальные основы FMEA для автомобилестроения: монография. Самара, 2014.

4. Строганов В.И. Итоги и перспективы развития электромобилей и автомобилей с гибридными силовыми установками / В.И. Строганов, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 2-3. С. 2-8.

5. Заятров А.В. Анализ и оценка взаимосвязей между традиционными показателями надежности и показателями, используемыми ведущими производителями легковых автомобилей / А.В. Заятров, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 1. С. 41-43. 37.

6. Козловский В. Комплексная оценка удовлетворенности потребителей качеством автомобилей / В. Козловский, В. Строганов, С. Клейменов // Стандарты и качество. 2013. № 5. С. 94-98.

7. Немцев А.Д. Моделирование - инструмент управления качеством продукции / А.Д. Немцев, В.Н. Козловский // Автомобильная промышленность. 2003. № 10. С. 1.

8. Козловский В.Н. Комплекс обеспечения качества системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, Д.И. Панюков // Saarbrücken, 2014.

9. Panyukov D.I. Highlights of russian experience in implementing ISO/TS 16949 / D.I. Panyukov, V.N. Kozlovskiy // Life Science Journal. 2014. Т. 11. № 8s. С. 439-444.

10. Козловский В.Н. Методология анализа и прогнозирования качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, А.В. Заятров // Актуальные проблемы экономики. 2016. Т. 186. № 12. С. 387-398.

11. Козловский В.Н. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1 / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 1. С. 40-49.

12. Козловский В.Н. Проблема стратегического планирования улучшения качества и надежности системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, А.В. Заятров // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 1. С. 44-47.

13. Panyukov D. Development and research FMEA expert team model / D. Panyukov, V. Kozlovsky, Y. Klochkov // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. 2020. Т. 27. № 5. С. 2040015.

14. Инновационные механизмы управления потенциалом сферы сервиса в регионе / Ерохина Л.И., Наумова О.Н., Любохинец Л.С., Лещишена В.П., Любохинец О.В., Кулапина Г.М., Маркова О.В., Никитина Н.В., Калашникова И.А., Дудко В.Н., Мещерякова Е.В., Козловский В.Н., Цветкова С.Н., Кретинина Т.В., Бреусова Е.А., Фатеева С.В., Новоселов С.Н., Ульяницкая Н.М., Шаблыкин М.М., Буряков Г.А. и др. Тольятти, 2013.

15. Дебелов В.В. Моделирование электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости / В.В. Дебелов, В.В. Иванов, В.Н. Козловский, В.И. Строганов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 6. С. 2-7.

16. Козловский В.Н. Концепция методологии комплексной программы улучшений / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.В. Айдаров, Д.И. Панюков, Р.Д. Фарисов Стандарты и качество. 2022. № 7. С. 36-42.

17. Строганов В.И. Математическое моделирование основных процессов электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин, Л.Х. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 7. С. 129-132.

18. Панюков Д.И. Новое руководство по FMEA: структурный анализ процессов / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2020. № 10. С. 36-42.

19. Козловский В.Н. Моделирование электронной системы VVT управления двигателем легкового автомобиля / В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 4. С. 5-12.

20. Козловский В.Н. Стратегическое планирование конкурентоспособности с точки зрения качества / В.Н. Козловский, С.А. Шанин, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2017. № 3. С. 76-80.

21. Kozlovskiy V. System of customer satisfaction monitoring by new cars in view of perceived quality / V. Kozlovskiy, D. Aydarov // Quality - Access to Success. 2017. Т. 18. № 161. С. 54-58.

Клентак Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, anna_klentak@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF THE AUTOMOBILE MANUFACTURER IN THE CONTEXT OF CREATING AN INDUSTRIAL ASSEMBLY

A.S. Klentak

The paper presents proposals for the development of the quality management system of the automaker in the context of creating an enterprise for industrial assembly of automobiles.

Key words: competitiveness, quality, quality management system, automobile production, industrial assembly.

Klentak Anna Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, anna_klentak@mail.ru, Russia, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 004.413
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-161-162

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ ВЫХОДЕ АВТОПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ НА НОВЫЕ РЫНКИ

В.Н. Козловский, А.С. Клентак, Д.И. Благовещенский, Н.А. Антонова

В работе представлен обзор и реализация наиболее значимых инструментов измерения удовлетворенности потребителей качеством новых автомобилей в эксплуатации, при решении задач автопроизводителя связанных с выходом на новые конкурентные рынки.

Ключевые слова: конкурентоспособность; качество; удовлетворенность потребителей; автосборочное производство.

Анализ передовой практики в области исследований качества автомобилей в эксплуатации показывает, что для современных легковых автомобилей наиболее актуальными внутренними являются исследования: качество автомобилей в первые 12 месяцев эксплуатации; качество в первые 36 месяцев эксплуатации или 100 тыс. км эксплуатационного пробега; блокирующих отказов автомобилей в первые 12 месяцев эксплуатации; блокирующих отказов за 36 месяцев эксплуатации или 100 тыс. км пробега автомобилей. На основании предложенных выше исследований выбираются соответствующие индикаторы и цели в области качества продукции автопроизводителя [1, 2].

Спектр универсальных инструментов используемых на международном уровне разнообразен и в том числе зависит от потенциального рынка, куда автопроизводитель выходит со своей продукцией. В частности, можно выделить наиболее актуальные исследования в Европе: удовлетворенность потребителей качеством автомобилей в эксплуатации в первый и в первые три года эксплуатации (SOFRES); исследование удовлетворенности потребителей качеством автомобилей в первый год эксплуатации автомобилей (JDP VQS); клубное исследование удовлетворенности потребителей качеством автомобилей (VQS Видение клуба (G5)).

Вне Европы, работают международные инструменты анализа удовлетворенности потребителей качеством новых автомобилей: JDP VQS (Россия, Индия и т.д.); Synovate PSI (Южная Африка); VOSS (Мексика); VQS Видение клуба (Турция) и т.д.

При выводе автомобилей на новый потребительский рынок автопроизводителю рекомендуется проводить как внутренние анкетные исследования, которые реализуются только относительно продукции собственного производства, например, Estel, Alfacom QAS (Южная Африка) 3 месяца, VQS 4 месяца и 1 год. Но, такие исследования должны быть уже связаны с оценкой потребительской удовлетворенности качеством продукции на новом рынке [3, 4]. Рекомендуется проводить бенчмаркинговые исследования удовлетворенности потребителей качеством автомобилей в эксплуатации, с привлечением экспертных институтов технического маркетинга. В этой части можно применить инструменты Fastracks (1 месяц эксплуатации, до 8 недель, FBSS (3 месяца затем 1 год эксплуатации).

Рассмотрим кратко основные инструменты исследования качества продукции и удовлетворенности потребителей при выводе автомобилей на новые рынки сбыта [5].

Исследование Estel. Анкетное исследование, которое можно реализовывать через телефонный опрос потребителей, по результатам первых трех месяцев эксплуатации автомобилей, или в отдельных случаях после первого года эксплуатации. Целью исследования является оценка качества автомобилей и природы основных жалоб, выраженных покупателями, на основании анализа которых реализуются местные мероприятия направленные на улучшение качества продукции [6].

Недостатком исследования является незначительная выборка потребителей для анкетирования – обычно выбирают от 100 до 200 респондентов.

Достоинством исследования является большое качественное значение результатов исследования, когда обеспечивается существенный объем дословной информации потребителей включающей: жалобы к качеству продукции, общие жалобы к продукции, жалобы по блокирующим отказам, а также определяются наиболее важные стороны продукции с позиции качества [7].

Итоги реализации рассматриваемого инструментария оценки удовлетворенности потребителей качеством автомобилей одной из ведущих марок отечественных легковых автомобилей, по результатам первого года эксплуатации представлены на рисунке 2. Результаты потребительской удовлетворенности систематизируются и обобщают-

ся по всем жалобам, а затем проводится их классификация по степени влияния возможных последствий проявления на безопасность и эксплуатационную эффективность автомобилей. При этом используется цветовая индикация, применение которой на уровне визуализации подчеркивает уровень важности проблемы выделенной потребителями. Применяется количественный индикатор Е (‰), отражающий приведенный уровень жалоб к 1000 автомобилей имеющих одну и также дату производства [8].

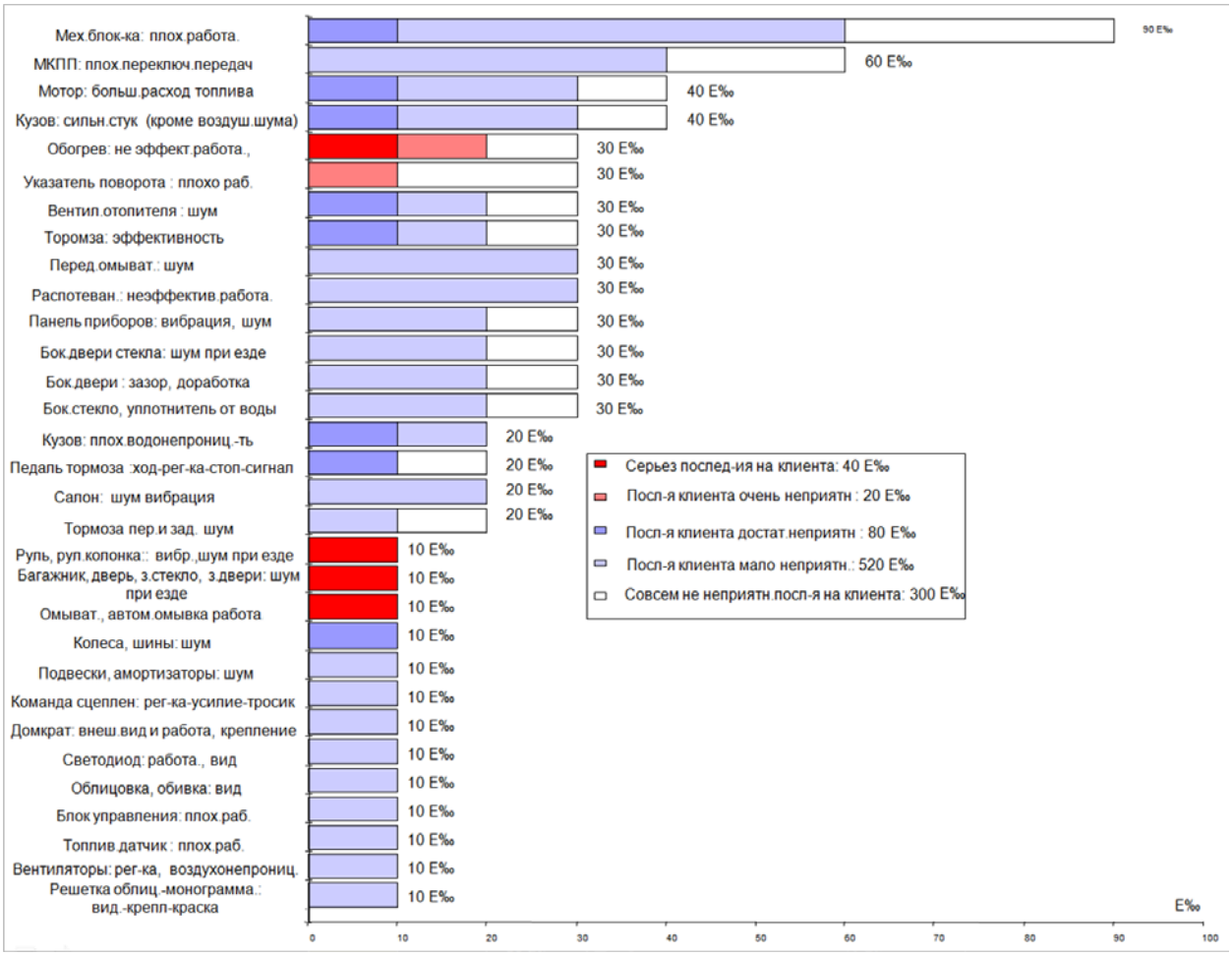


Рис. 2. Гистограмма распределения жалоб потребителей по вопросам качества автомобилей по результатам первого года эксплуатации построенная с применением инструмента исследования Estel

Исследование удовлетворенности потребителей качеством автомобилей при позиционировании продукции на новом рынке Fastracks. Анкетирование по телефону по типу Estel, в очень короткое время после запуска в продажу, без учета автомобилей конкурентов. Цель проведения исследования - оценить на момент запуска в продажу количество и природу жалоб покупателей нового автомобиля после первого полного месяца эксплуатации. Недостатки исследования заключаются в небольшом статистическом значение числа участвующих в опросе респондентов. Обычно выборка включает в себя не более 50 клиентов. Исследование проводится в течении 8 недель. Достоинства исследования определяются большим качественным объемом потребительской информации включающей дословную передачу: жалоб на качество, жалобы на продукцию, степень важности, блокирующие отказы. Также достоинством исследования является большая реактивность, взаимодополняемость с результатами мониторинга отказов автомобилей в гарантии [9].

Исследование удовлетворенности потребителей качеством автомобилей в эксплуатации при позиционировании автопроизводителя на новых рынках FBSS (First Buyer Satisfaction Survey). Исследование качества продукции, проводимое путем непосредственного интервьюирования потребителей «лицом к лицу» после запуска в продажу продукции и не ранее чем через 3 месяца, а затем после первого 1 года эксплуатации. Представляет собой качественный глубокий опрос нескольких клиентов об автомобиле. Исследование позволяет реализовать инструментарий опроса клиентов автопроизводителя и конкурентов на рынке [10].

Цели проведения исследования - оценить количество и природу жалоб покупателей новых автомобилей после 3 месяцев/ 1 года эксплуатации и измерить их уровень удовлетворенности.

Достоинства применения инструментария: богатая качественная часть результатов в которой много дословной передачи потребительской информации (жалобы на качество, жалобы на продукцию, степень важности). Также результаты исследования позволяют получить достаточно полную количественную характеристику качества продукции в эксплуатации, за счет широкой выборки респондентов. Инструмент обеспечивает возможности бенчмаркинга, то есть реализации исследований из условий конкурентного рынка, а также инструмент дает возможность получения наиболее полной оценки общей и детализированной информации об потребительской удовлетворенности с ранжированием проблем качества автомобилей в эксплуатации.

Рассмотрим результаты реализации инструмента FBSS на примере автомобилей конкурирующих марок. Модель 1 – популярная марка автомобилей отечественного производства. Модель 2 – конкурирующая модель автомобилей иностранного производства. Цель проведенного исследования заключается в определении основных позиций удовлетворенности/неудовлетворенности потребителей качеством автомобилей с выявлением ТОП основных проблем. Количество интервью – 400, проведенное по телефону, выполненные на основе 30-ти минутного опросника. Интервьюированные – только частные собственники. Учитываются только клиенты автомобилей с датой производства – март, апрель 2022г. Период эксплуатации – 1 год. Социально-демографические профили клиентов, представлены на рисунке 3.



Рис. 3. Социально демографический профиль потребителей автомобилей по моделям

Основные факторы, определяющие причины покупки автомобилей конкурирующих марок представлены на рисунке 4. ТОП 3 фактора при выборе автомобиля иностранного автопроизводителя включают: цена, не дорогая; высокие показатели общей долговечности, прочности, общего качества сборки, а также выносливость. Причинами покупки автомобиля отечественного производства являются: цена, не дорогая; внешний стиль, отделка, современный спортивный дизайн; новая модель, новое исполнение.



Рис. 4. Процесс покупки автомобиля: Основные причины покупки

Анализ потребительских данных, отражающих влияние гарантийных обязательств автопроизводителя на процесс покупки автомобилей представлен на рисунке 5, из которого видно, что автомобиль иностранного производства по данному фактору для потребителей выглядит более выигрышно.

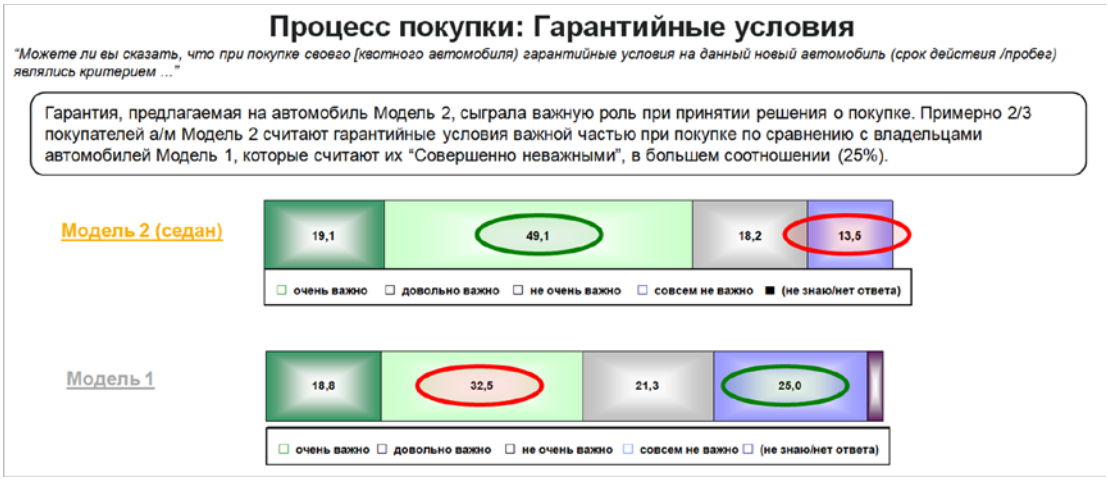


Рис. 5. Результаты исследования потребительского поведения по фактору условий гарантийного обслуживания автомобилей

Теперь рассмотрим процесс покупки конкурирующих марок автомобилей с точки зрения взаимного влияния недостатков продукции по параметрам качества. На рисунке 6 представлены результаты такого анализа. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что примерно половина потенциальных покупателей автомобилей (43,1%), принимая решение о покупке нового автомобиля, учитывает недостатки конкурирующей модели (рис. 6).



Рис. 6. Покупательская оценка автомобиля, с учетом недостатков конкурента

С точки зрения анализа показателя среднего пробега автомобилей, получается что и первая (отечественная) и вторая (иностранная) модели, после первого года эксплуатации имеют примерно одинаковый средний пробег, приближающийся к 20 тыс. км. С другой стороны, существенное отличие между автомобилями, в сегменте пробегов больше 23 тыс. км. Здесь автомобиль иностранного производства имеет потребительскую долю равную 27,6%, что существенно превышает долю 18,8% характерную для потребителей отечественной марки автомобилей. Это, кстати говоря очень хорошо коррелируется с данными отражающими основные причины покупки, где второй по важности позицией является надежность рассматриваемого автомобиля (рисунок 7).

Результаты анализа ответов на вопрос об использовании новых автомобилей, с точки зрения перевозки пассажиров, показывают примерно одинаковые условия, когда основная масса потребителей перевозит пассажиров на переднем сиденье. Существенным отличием обладает сегмент потребителей Модели 2, перевозящих пассажиров на заднем сиденье по сравнению с потребителями автомобилей Модели 1.



Рис. 7. Распределение пробега автомобилей в первый год эксплуатации



Рис. 8. Результаты анализа данных об использовании автомобилей, в сегменте вопросов отражающем перевозку пассажиров

Важным элементом в оценке потребительской удовлетворенности качеством автомобилей является сегмент вопросов отвечающий за эмоциональные и спонтанные отзывы. В методологии исследования потребительской удовлетворенности данный аспект рассматривается как инструмент оценки – нравится / не нравится. По результатам исследования, ТОП факторов определяющих удовлетворенность потребителей качеством автомобилей отечественной марки Модель 1 включает: удобство вождения; просторность и вместительность; комфорт. ТОП факторов определяющие позиции неудовлетворенности включает: шумы; характеристики двигателей; проблемы с вентиляцией, обогрев, кондиционирование воздуха (рисунок 9).



Рис. 9. Гистограммы распределения показателей удовлетворенности потребителей качеством автомобилей в сегменте вопросов нравится / не нравится по Модели 1

Результаты анализа удовлетворенности потребителей качеством автомобилей иностранного производства в сегменте вопросов анкеты отвечающей за спонтанные (эмоциональные) заключения, представлены на рисунке 10. Здесь, в отличие от автомобилей отечественной марки, в гистограмме распределения факторов удовлетворенности первые позиции занимают показатели: размер багажника, удобный доступ; просторность вместительность; комфорт. Гистограмма распределения факторов по позициям неудовлетворенности включает вопросы к внешнему виду и отделки салона, шумы, и также более детализированные проблемы связанные с невысоким качеством материалов отделки салона (рисунок 10).



Рис. 10. Гистограммы распределения показателей удовлетворенности потребителей качеством автомобилей в сегменте вопросов нравится / не нравится по Модели 2

Интегральная удовлетворенность потребителей качеством автомобилей, может быть оценена на основе соответствующего вопроса в анкете, с последующим разделением потребительских ответов на сегменты (рисунок 11). В нашем случае, по продукции иностранного автопроизводителя (Модель 2), сегмент полностью удовлетворенных потребителей значительно выше чем у отечественной марки автомобилей (Модель 1). С другой стороны, для обеспечения приближения рассматриваемого показателя к оценке автомобиля второй модели, у отечественного автопроизводителя есть возможности определяемые размером желтой зоной в которой сосредоточены ответы незначительно удовлетворенных потребителей. Желтая зона отечественной марки занимает 23,8% потребителей, против 4,9% у конкурента.

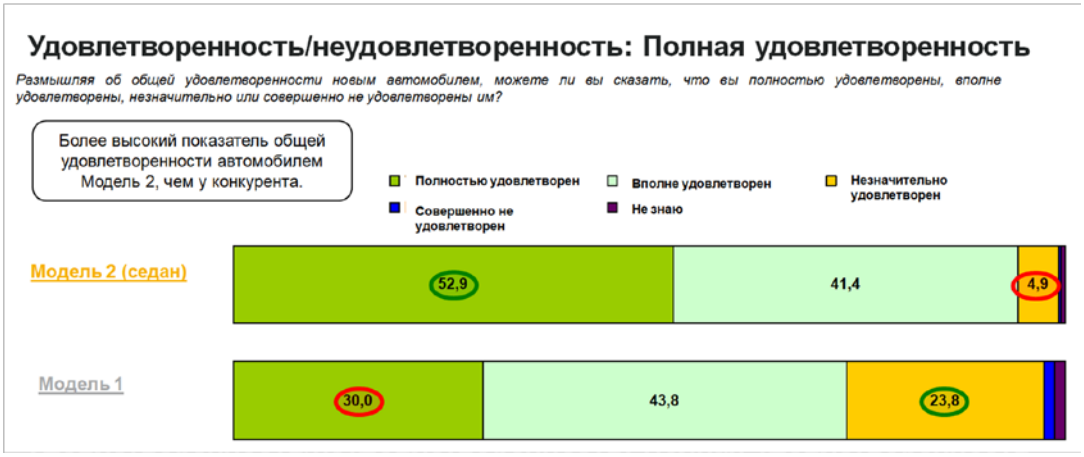


Рис. 11. Распределение потребителей по сегментам в статистике ответов на вопрос о полной удовлетворенности качеством новых автомобилей по рассматриваемым маркам

Гистограммы распределения ответов потребителей при более детализированном анализе вопросов определяющих удовлетворенность и неудовлетворенность потребителей качеством новых автомобилей мо отечественной марке (Модель 1) в эксплуатации, представлены на рисунках 12 и 13. Здесь представлен более глубокий результат, в сравнении с ранее выделенной статистикой эмоциональных ответов, поскольку оператор проводящий опрос имеет возможность уточнить задаваемый вопрос, предложить дополнить ответ и т.д., таким образом, получаем значительно более детализированные с точки зрения оценки потребительского качества факторы определяющие удовлетворенность и неудовлетворенность.

Существенная проработка факторов удовлетворенности или неудовлетворенности потребителей качеством новых автомобилей предложенная на рисунках 12 и 13, с одной стороны позволяет автопроизводителю выделить аспекты определяющие достоинства продукта, а с другой выделить те элементы оценки, которые значительно снижают удовлетворенность качеством. Среди высоких оценок по рассматриваемой отечественной марки выделим аспекты удобства к передним сидениям, вместительность и внутреннее пространство, а также хорошее наружное освещение. Наиболее значимые отрицательные оценки получили аспекты «держания» дороги, удобства сидений, адаптация к местным дорожным ограничениям.



Рис. 12. Детализированные аспекты обеспечивающие удовлетворенность потребителей качеством автомобиля Модели 1



Рис. 13. Детализированные аспекты снижающие удовлетворенность потребителей качеством автомобиля Модели 1

Используя полученные результаты (рисунки 12 и 13), можно построить экран, отражающий имиджевую оценку качества автомобилей со стороны потребительского сообщества, разместив детализированные аспекты в четыре сегмента определяющие достоинства продукции, ее недостатки, возможности и опасности для автопроизводителя в случае снижения или повышения качества продукции по соответствующим аспектам [11, 12].

Как видно, наиболее значимые недостатки включают в себя позиции связанные с адаптированностью автомобилей к локальным дорожным ограничениям; «держанием» дороги; не высокой эффективностью (КПД) амортизаторов. Данные аспекты напрямую связаны с проблемами качества отечественной марки автомобилей причинами

которых являются не высокое качество подвески и ее элементов, приводящее к преждевременному износу и замене элементов системы, а также невысокое качество конструкции усилителя рулевого управления, включающее заложенные неэффективные алгоритмы управления, следствием применение которых является необходимость постоянного «подруливания» автомобилем в процессе эксплуатации. Желтая зона определяет риски, связанные с тем , что даже незначительное снижение качества продукции по представленным аспектом несет существенные потери имиджа марки автопроизводителя. Собственно пирамида определяющая реактивность мероприятий направленных на улучшение качества автомобилей отечественной марки (рисунок 14), как раз отражает именно наиболее острые проблемы, связанные с недостатками и опасностями.



Рис. 14. Пирамида менеджмента определяющая стратегию по выработке решений направленных на улучшение качества продукции по наиболее острым вопросам волнующим потребителей



Рис. 15. Пример результатов исследования качества автомобилей в эксплуатации с помощью инструментария JD Power VQS (Vehicle Quality Survey)

Исследование продукции на конкурентном рынке (JD Power VQS (Vehicle Quality Survey). Исследование потребительской удовлетворенности посредством анкетирования через почту, обычно выполняемое по результатам первых трех месяцев эксплуатации новых автомобилей. Вопросная база анкеты направлена направлен на выявление жалоб к качеству и на оценку привлекательности продукции.

По результатам реализации исследования оценивается количественный уровень жалоб потребителей на качество (IQS) и привлекательность продукции (APEAL). Также одним из значимых результатов исследования является классификация марок и моделей по уровню конкурентоспособности на рынке определяемая по степени удовлетворенности потребителей. Недостатком исследования является слабая качественная часть, реализуемая через ограниченные возможности передачи дословной потребительской информации. При этом положительной стороной ис-

следования является значительный статистический охват потребительской аудитории, до нескольких тысяч человек, а также хорошая детализация жалоб и оценка удовлетворенности потребителей. Пример реализации исследования, при позиционировании автомобилей Renault на индийском рынке, представлен на рисунке 15.

Другой пример реализации рассматриваемого исследования представлен на рисунке 16. Здесь в динамике представлено изменение позиций определяющих привлекательность автомобильных брендов Renault и Nissan для потребителей на европейском рынке (верхняя диаграмма). Более детализированный анализ конкурентоспособности автомобилей с учетом сегментации продукции на рынке предложен на нижней диаграмме.

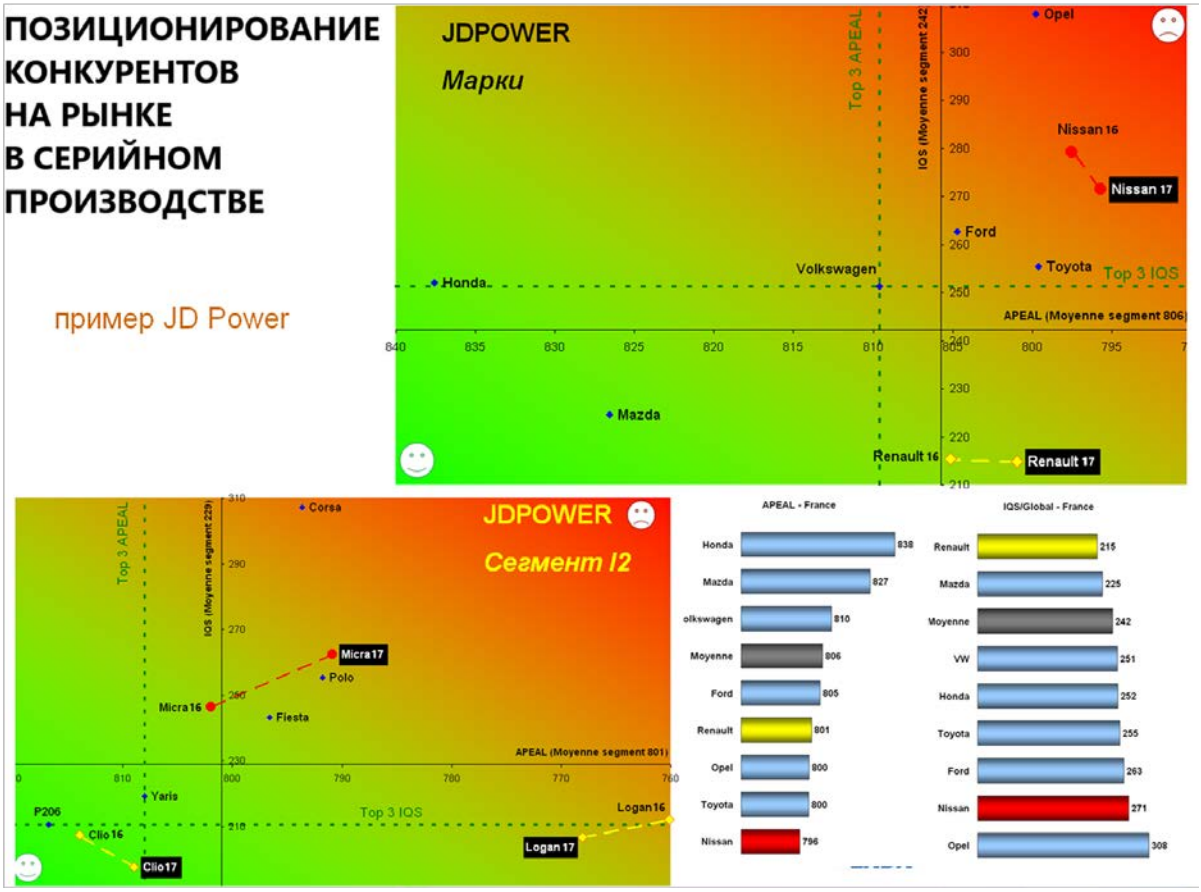


Рис. 16. Примеры реализации JD Power VQS для продукции автопроизводителей на европейском рынке

Следующий инструмент исследования позиционирования конкурентов в серийном производстве - SOFRES 1 и 3 года эксплуатации новых автомобилей, реализуется на европейском автомобильном рынке. Это клубное исследование качества новых автомобилей в эксплуатации, также как и предыдущее реализуется через анкетирование потребителей по почте, выполняемого TNS-Sofres после 1 и 3 лет эксплуатации по специальному вопроснику, по 4 странам (1 год эксплуатации) и 2 странам (3 года эксплуатации).

С использованием рассматриваемого исследования оценивается количество потребительских жалоб к качеству автомобилей (S°/°° промилле), а также их характеристики по степени серьезности (блокирующие отказы, обязывающие обратиться на предприятия фирменного автосервиса). Также, реализация исследования позволяет дать оценку удовлетворенности потребителей в общем и на детальном уровне. Так как исследование клубное, то результаты его проведения позволяют сделать сравнения марок автомобилей на рынке по критериям удовлетворенности потребителей качеством автомобилей.

Достоинством рассматриваемого инструмента является повышенное качественное значение результатов, за счет того что информационная база потребительских отзывов формируется на основе дословной передачи мнений, а также выработки мер направленных на обобщение и детализацию оценки удовлетворенности потребителей. Также достоинством рассматриваемого инструмента является хороший статистический объем информации, на основе которого проводится ранжирование проблем качества автомобилей разных марок. Дополнительным достоинством инструмента является то, что его результаты хорошо коррелируются с показателями эксплуатации автомобилей по уровню дефектности К°/°° в гарантийный период, данные о которой формируются автопроизводителем самостоятельно. Результаты исследования позволяют проводить анализ позиционирования бренда (марки) автомобилей на конкурентном рынке по показателям определяющим качество продукции. У рассматриваемого исследования уже сложилась достаточно длинная история, поскольку его реализуют с 1998 года, что также позволяет проводить анализ изменения конкурентоспособности автопроизводителей на европейском рынке. Пожалуй, одним из немногих недостатков аналитического инструмента является то, что оно реализуется исключительно в Европе (рисунок 17).

Рассмотренные инструменты измерения конкурентоспособности автомобилей используются автопроизводителями для оценки удовлетворенности потребителей качеством продукции при позиционировании в том числе на новых рынках, в том числе непосредственно на этапах создания и развития предприятий по промсборке.

Представляется, что кроме выделенных инструментов, при решении сложной задачи направленной на обеспечение конкурентоспособности автопроизводителей на новых рынках присутствия, необходимо также использовать отработанный научно-технический инструментарий, который представлен в диссертационных работах В.И. Строганова, Д.И. Благовещенского, Д.В. Айдарова, Е.В. Поляковой, С.А. Шанина, Н.А. Антоновой, Р.Р. Гафарова и др. Это связано с тем, что широкий охват и применение развитого арсенала аналитических исследований в области качества продукции обеспечивает формирование достоверной и полной информации, применение которой в процессе принятия решений создает предпосылки для лучшего результата.

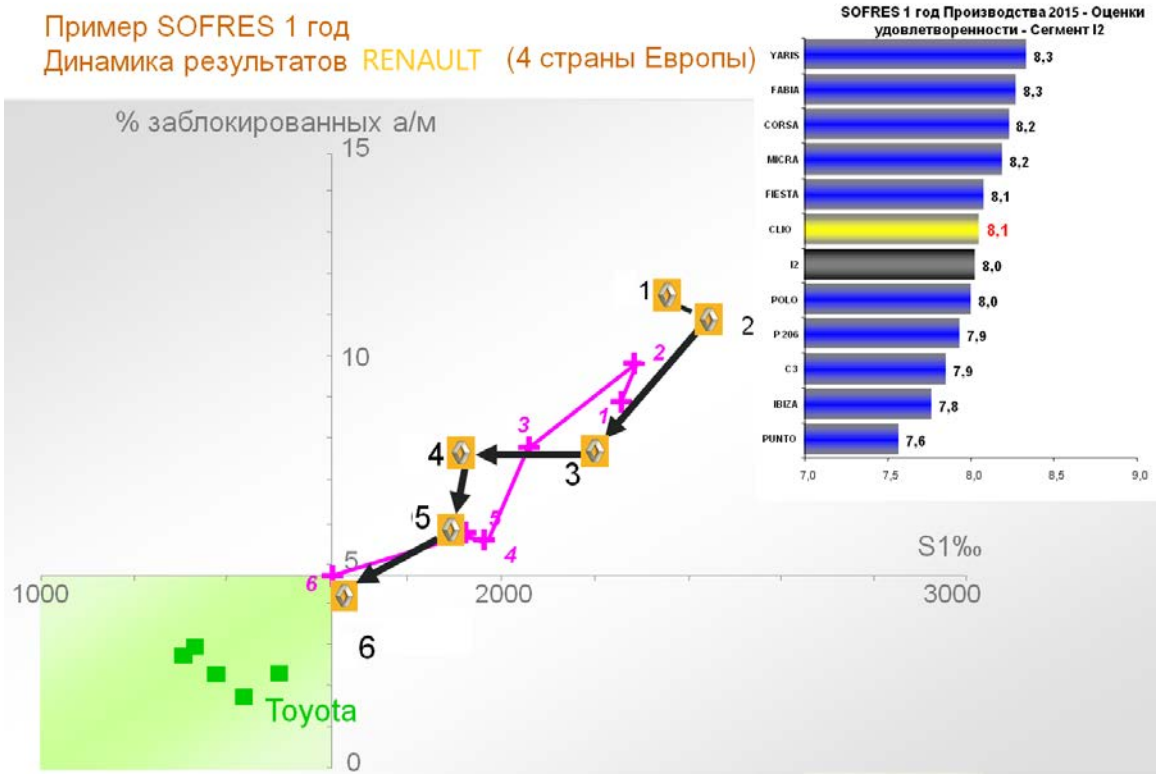


Рис. 17. Пример реализации исследования потребительского качества автомобилей SOFRES 1 год эксплуатации

Подходя к концептуальному вопросу создания процесса связанного с реализацией деятельности по исследованию удовлетворенности потребителей качеством автомобилей при развитии предприятий по промсборке автомобилей необходимо сразу же сделать акцент, на то, что этот процесс должен быть интегрирован в корпоративную СМК автопроизводителя, но при этом реализация отдельного инструментария может быть делегировано службам качества предприятия промсборки.

Вся представленная выше информация, относящаяся к системности решения проблемы обеспечения конкурентоспособности автопроизводителя, а также данные показывающие наиболее актуальный инструментарий измерения качества, при выходе корпорации на новые рынки, актуализирует необходимость создания стройной системы реализации мер по своевременному получению и анализу информации отражающей качество продукции в эксплуатации. И здесь на наш взгляд первичное внимание автопроизводителя должно быть уделено на измерение удовлетворенности конечного потребителя качеством продукции. Еще одним важным аспектом рассматриваемого вопроса является необходимость своевременного вскрытия наиболее важных проблем качества продукции в эксплуатации. И, наконец, еще одним ключевым аспектом решения вопроса связанного с организацией системной работы по оценке конкурентоспособности автомобилей на новых рынках, является необходимость проведения бенчмаркинговых исследований, то есть исследований качества продукции собственного производства в сравнении с продукцией конкурентов.

Опять же возвращаясь к выделенным аспектам исследований качества продукции применяемых на международных рынках можно сформулировать три наиболее важных периода оценки потребительского качества: первый и первые три месяца эксплуатации – первичная или начальная удовлетворенность потребителей; первый год эксплуатации – оценка удовлетворенности потребителей продукции и сточки зрения первичной и сточки зрения уже более существенного опыта эксплуатации; первые три года эксплуатации – оценка надежности продукции.

Графически, схему организации процесса анализа качества автомобилей в эксплуатации, при выходе автопроизводителя на новые рынки и организации промсборки, можно представить в виде системы связей (рисунок 18). По сути, также как и ранее при рассмотрении общих вопросов процессного управления, схема построена в соответствии с идеологией цикла PDCA Э. Деминга. В соответствии с предварительно проведенными исследованиями на перспективном рынке, автопроизводитель формулирует цели в области качества для собственной продукции и переходит к развитию проекта просборки, в рамках контракта. Далее после выпуска новой продукции, ее продажи конечному потребителю начинают проводиться исследования удовлетворенности потребителей качеством продукции по следующим классификаторам: исследование позиционирования продукции на новом рынке (по типу Fastracks, Estel) после первого месяца эксплуатации с целью определения количества и природы жалоб потребителей к качеству автомобилей; исследование позиционирования продукции на новом рынке (по типу FBSS (First Buyer

Satisfaction Survey)), с целью оценки количества и природы жалоб покупателей новых автомобилей после 3 месяцев/ 1 года эксплуатации с измерением уровня удовлетворенности потребителей качеством продукции – здесь уже реализуется функционал оценки синхронизации целей к качеству продукции сформулированных на старте проекта и полученного фактического качества продукции, с возможностью разработки и реализации мероприятий направленных на достижение установленных целевых показателей. Далее необходимо встроить группу исследований позволяющих дать результат на уровне бенчмаркинга и оценки продукции в условиях конкурентного рынка. Здесь могут пригодиться инструменты по типу JD Power VQS, SOFRES. В итоге мы получили достаточно унифицированную базу для организации процесса оценки конкурентоспособности продукции автопроизводителя при развитии промсборки.

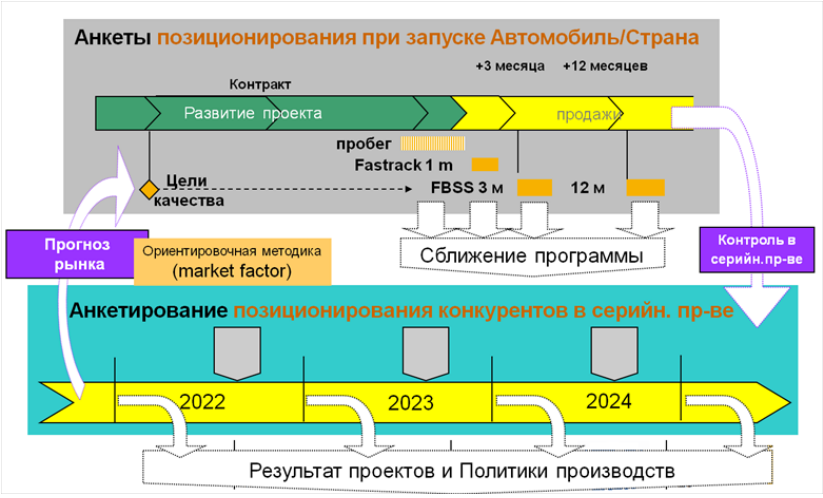


Рис. 18. База создания процесса анализа качества автомобилей при развитии промсборки автопроизводителя

Сразу же отметим, разработанная нами база процесса не является исчерпывающей, но уже позволяющей проводить важную работу направленную на измерение показателей конкурентоспособности и качества автомобилей.

Далее, мы будем дополнять разрабатываемый процесс новым инструментарием, тем самым модернизируя и обогащая базовый вариант процесса, путем включения дополнительного аналитического инструментария включающего как внутренний опыт автопроизводителей так и другие исследования качества автомобилей в условиях конкурентного рынка.

В любом случае, исходя из спроектированного базового варианта уже можно сформулировать основные задачи процесса: перспективное прогнозирование развития качества продукции на новых рынках; определение целей по проекту продукции предприятия промсборки в стране присутствия включающие уровни дефектности, жалоб, а также оценки удовлетворенности потребителей качеством продукции; реактивность предприятия в решении проблем качества, полнота учета жалоб потребителей, оценка потребительских свойств продукции с ранжированием их по уровню влияния на удовлетворенность потребителей.

Механизмы разрабатываемого процесса должны обеспечивать решение задач в области управления удовлетворенностью потребителей, а также должны быть реализованы все необходимые действия по управлению улучшением.

Список литературы

1. Козловский В.Н. Методология анализа и прогнозирования качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, А.В. Заятров // Актуальные проблемы экономики. 2016. Т. 186. № 12. С. 387-398.

2. Козловский В.Н. Проблема стратегического планирования улучшения качества и надежности системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, А.В. Заятров // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 1. С. 44-47.

3. Panyukov D. Development and research FMEA expert team model / D. Panyukov, V. Kozlovsky, Y. Klochkov // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. 2020. Т. 27. № 5. С. 2040015.

4. Инновационные механизмы управления потенциалом сферы сервиса в регионе / Л.И. Ерохина, О.Н. Наумова, Л.С. Любохинец, В.П. Лещишена, О.В. Любохинец, Г.М. Кулапина, О.В. Маркова, Н.В. Никитина, И.А. Калашникова, В.Н. Дудко, Е.В. Мещерякова, В.Н. Козловский, С.Н. Цветкова, Т.В. Кретинина, Е.А. Бреусова, С.В. Фатеева, С.Н. Новоселов, Н.М. Ульяницкая, М.М. Шаблыкин, Г.А. Буряков и др. // Тольятти, 2013.

5. Козловский В.Н. Концепция методологии комплексной программы улучшений / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.В. Айдаров, Д.И. Панюков, Р.Д. Фарисов // Стандарты и качество. 2022. № 7. С. 36-42.

6. Панюков Д.И. Новое руководство по FMEA: структурный анализ процессов / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2020. № 10. С. 36-42.

7. Козловский В.Н. Стратегическое планирование конкурентоспособности с точки зрения качества / В.Н. Козловский, С.А. Шанин, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2017. № 3. С. 76-80.

8. Kozlovskiy V. System of customer satisfaction monitoring by new cars in view of perceived quality / V. Kozlovskiy, D. Aydarov // Quality - Access to Success. 2017. Т. 18. № 161. С. 54-58.

9. Kozlovsky V.N. Calculation and statistical experiment on the monte carlo method when assessing the stability of the technical characteristics of the automobile generator set in mass production / V.N. Kozlovsky, V.E. Lysov, V.V. Ermakov, D.V. Antipov, D.F. Skripnuk // В сборнике: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. 2019. С. 565-568.

10. Козловский В.Н. Мониторинг удовлетворенности потребителей качеством автомобилей / В.Н. Козловский, Д.В. Антипов, Д.И. Панюков // Стандарты и качество. 2016. № 6. С. 100-105.

11. Козловский В.Н. Цифровизация и проблемы трудовых коллективов: роли и ответственность / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, Д.И. Панюков, Р.Р. Гафаров // Стандарты и качество. 2022. № 1. С. 94-98.

12. Панюков Д.И. Моделирование процедуры FMEA: анализ рисков / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров // Методы менеджмента качества. 2019. № 9. С. 34-43.

Козловский Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Kozlovskiy-76@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Клентак Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, anna_klentak@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Благовещенский Дмитрий Иванович, д-р техн. наук, профессор, dblagov1@yandex.ru, Россия, Тула, Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Тульской и Орловской областях,

Антонова Наталья Алексеевна, аспирант, vera1967.antonova@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

TOOLS FOR RESEARCHING CONSUMER SATISFACTION AND QUALITY OF CARS IN OPERATION WHEN AUTOMOBILE MANUFACTURERS ENTER NEW MARKETS

V.N. Kozlovsky, A.S. Klentak, D.I. Blagoveshchensky, N.A. Antonova

The paper presents an overview and implementation of the most significant tools for measuring consumer satisfaction with the quality of new cars in operation, when solving the problems of an automaker associated with entering new competitive markets.

Key words: competitiveness, quality, consumer satisfaction, automobile assembly production.

Kozlovsky Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, Kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Klentak Anna Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, anna_klentak@mail.ru, Russia, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Blagoveshchensky Dmitry Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, dblagov1@yandex.ru, Russia, Tula, State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in the Tula and Orel Regions,

Antonova Natalya Alekseevna, postgraduate, vera1967.antonova@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 005.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-172-173

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Е.К. Савич, Д.В. Антипов

В статье представлена структурная модель цифровой платформы системы менеджмента качества, позволяющей обеспечить стабильное качество поставляемой продукции; оптимизировать внутренние процессы управления и производства; снизить трудоемкость выполнения процессов, процедур и функций по планированию, обеспечению, контролю и повышению качества; сократить риски при поставках комплектующих, сырья и услуг и др.

Ключевые слова: качество, модель, цифровая платформа, цифровой инструментарий, система менеджмента качества.

В современных условиях цифровизации общества успешность функционирования систем менеджмента качества во многом зависит от возможности внедрения на предприятии качественно новых технологий управления, а также технологий производства. Цифровизация понимается как внедрение информационных технологий во все сферы жизни общества посредством использования информационно-коммуникационных технологий. Велика роль цифровизации в развитии предприятий [1,2].

Благодаря интеграции технологий цифровизации систем менеджмента качества бизнес-процессов предприятия, обеспечивается прозрачность данных бизнес-процессов, их синхронизация, повышается возможность сбора актуальных данных о конкретном изделии, выделения его ключевых характеристик, обеспечивается доступность управления проектами, возможность визуализации всех стадий жизненного цикла изделия, своевременного внесения изменений на обнаруженные несоответствия, направленные на их устранение [3].

Несмотря на готовность к широкому использованию информационных технологий, степень проникновения цифровых решений в промышленности достаточно низкая. Для цифровой трансформации предприятия необхо-

димо комплексное решение по внедрению цифрового инструментария управления качеством на производство. Цифровые инструменты управления качеством позволит предприятиям соблюдать стандарты, автоматизируя процессы контроля и документирования, что снизить трудоемкость при подготовке к аудиту и сертификаций. В качестве комплексного решения поставленной проблемы возможно использовать цифровую платформу системы менеджмента качества.

Цифровая платформа системы менеджмента качества представляет собой интегрированное программное решение, направленное на автоматизацию и оптимизацию процессов управления качеством продукции и услуг на всех этапах жизненного цикла. Ключевыми компонентами структурной модели цифровой платформы системы менеджмента качества (СМК) являются (рис. 1):

– модули автоматизации и мониторинга, позволят снизить ручной труд и ошибки за счет автоматизации рутинных задач. Разделение системы на функциональные модули позволит масштабировать платформу за счет легкого добавления новых или модификации и постоянного улучшения уже разработанных. Также модульная система позволит использовать на предприятиях только часть модулей, в зависимости от функциональных потребностей предприятия;

– инструменты аналитики и отчетности, предназначены для генерации аналитических отчетов и статистики для оценки эффективности системы менеджмента качества и принятия обоснованных управленческих решений. Инструменты позволяют выявлять тенденции и области, требующие улучшения;

– система уведомлений и оповещений, необходима для непрерывного наблюдения за процессами и продукцией для своевременного выявления и устранения отклонений от стандартов качества. Система автоматически уведомляет ответственные лица о выявленных несоответствиях и нарушениях;

– поддержка соответствия стандартам позволит обеспечить соответствие международным и национальным стандартам качества, а также нормативным требованиям предприятия, что необходимо для сертификации и лицензирования;

– управление обучением и развитием персонала направлено на отслеживание квалификации и компетенций сотрудников, что способствует повышению общего уровня знаний и навыков в области качества;

– основой для цифровой платформы СМК служит централизованная база данных, объединяющая все данные, связанные с качеством, в одном месте для легкого доступа и анализа.



Рис. 1. Компоненты структурной модели цифровой платформы СМК

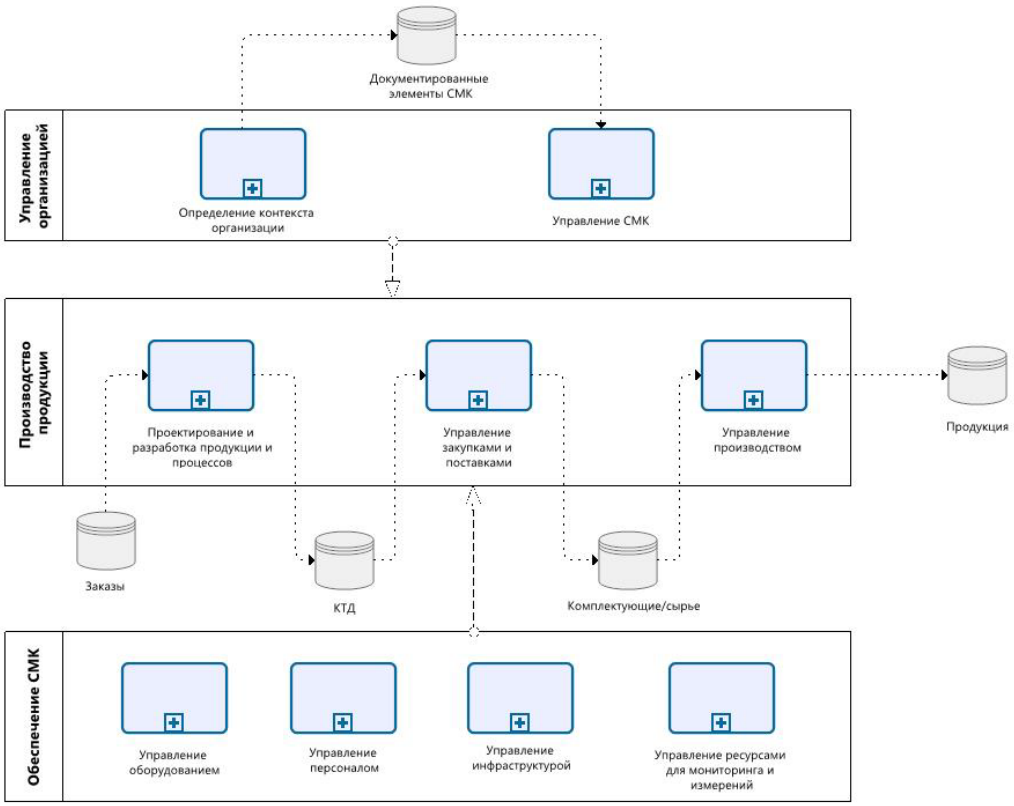


Рис. 2. Процессная модель системы менеджмента качества верхнего уровня

Ключевыми компонентами цифровой платформы является цифровой инструментарий управления качеством на этапах жизненного цикла продукции. Перечень цифрового инструментария управления качеством должен основываться на чётко определённых процессах компании, которые могут быть автоматизированы и контролируемы с использованием цифровых технологий. На рис. 2 представлена структура процессов управления предприятием верхнего уровня, на которые направлена система менеджмента качества.

Исходя из предложенной структуры в основу цифровой платформы положена модель системы менеджмента качества, основными функциональными блоками которой являются:

1) блок управления организацией, состоящий из процесса определения контекста организации и процесса управления системой менеджмента качества;

2) блок основных процессов организации включает процессы по проектированию и разработке продукции и процессов, по управлению закупками и поставками и по управлению производством;

3) блок обеспечивающих процессов организации разделен на процессы по управлению оборудованием, по управлению персоналом, по управлению инфраструктурой и по управлению ресурсами для мониторинга и измерений.

Каждый блок выполняет определённые задачи, а взаимодействие между ними обеспечивается с помощью баз данных.

Для формирования модульной составляющей, исходя из представленных процессов определен необходимый перечень цифрового инструментария управления качеством, интеграция между собой которого позволит получить программное решение, объединяющее все процессы управления качеством, от разработки до утилизации продукции:

– определение контекста организации;
– управление системой менеджмента качества;
– проектирование и разработка продукции и процессов;
– управление закупками и поставками;
– управление производством;
– управление оборудованием;
– управление персоналом;
– управление инфраструктурой;
– управление ресурсами для мониторинга и измерений.

Цифровой инструментарий состоит из программных модулей, позволяющих автоматизировать процесс использования основных инструментов системы менеджмента качества на всех этапах жизненного цикла продукции.

На рис. 3-5 представлена структура программных модулей инструментов СМК для каждого из функциональных блоков цифровой платформы.



Рис. 3. Модульная структура функционального блока основных процессов организации



Рис. 4. Модульная структура функционального блока по управлению организацией

Модульная архитектура цифровой платформы СМК позволяет быстро адаптироваться к изменениям во внешней и внутренней среде предприятия, увеличения объема данных и процессов, включая изменения в требованиях клиентов, регуляторных нормативах и технологических инновациях путем интеграции в структуру новых модулей, либо модификации уже существующих модулей, не затрагивая общую структуру платформы.



Рис. 5. Модульная структура функционального блока обеспечивающих процессов организации

Помимо цифрового инструментария управления качеством на этапах жизненного цикла продукции к компонентам цифровой платформы СМК относятся (рис. 1):

1) поддержка соответствия стандартам

– поддержка соответствия стандартам обеспечивает соответствие продукции и процессов как международным требованиям качества (международные стандарты, такие как ISO 9001, ISO 14001, ISO/TS 16949 и другие), так и внутренним требованиям предприятия (стандарты организации, рабочие инструкции, записи и другие нормативные документы);

2) инструменты аналитики и отчетности

– для анализа и принятия решений в системе предусмотрено использование инструментов аналитики данных и искусственного интеллекта. Это могут быть системы прогнозирования на основе данных о предыдущих отклонениях или систем машинного обучения для улучшения процесса контроля качества;

3) управление обучением и развитием персонала

– несмотря на цифровизацию, компетентность сотрудников предприятия при управлении качеством играет значительную роль. Для повышения квалификации сотрудников и их осведомленности о требованиях к качеству необходимо автоматизировать процессы обучения персонала. Также важным элементов является создание и поддержка базы знаний для распространения лучших практик и повышения уровня компетенций внутри организации.

Цифровизация невозможна без использования технологий интеграции и мониторинга производственных процессов в реальном времени. Для того чтобы цифровая платформа СМК работала эффективно, необходимо обеспечить её интеграцию с другими системами предприятия, такими как:

– система управления взаимоотношениями с потребителями (CRM);
– система управления инженерными данными (PDM);
– система управления ресурсами организации (ERP);
– система управления производством (MES);
– BI-система;
– информационная нормативно-правовая база;
– управления жизненным циклом продукции (PLM).



Рис. 6. Структурная модель цифровой платформы системы менеджмента качества

Необходимым условиям функционирования платформы является то, что данные о качестве должны беспрепятственно передаваться от указанных систем предприятия к платформе, так и в обратном порядке.

Сбор данных о процессах является ключевым для их дальнейшего анализа и принятия решений. Без чёткого контроля данных и их интерпретации система не сможет эффективно управлять качеством.

Для мониторинга и контроля данных в производстве используются цифровые датчики для постоянного мониторинга ключевых показателей качества. Следовательно, модель цифровой платформы должна содержать цифровой инструментарий для сбора данных и интеграции этих данных с центральной системой управления качеством. Цифровой инструментарий для сбора данных включает в себя применение различных чат-ботов для сбора информации, использование SCADA системы (АСУ ТП) и применение IoT для дальнейшей интеграции полученных данных.

Основой для создания и внедрения цифровой платформы СМК является централизованная база данных. База данных определяет структуру и совокупность данных по качеству, собираемых на разных этапах жизненного цикла. База данных позволяет собирать, обрабатывать, анализировать и сохранять всю информацию по качеству продукции и результативности функционирования процессов СМК производственного предприятия.

На рис. 6 представлена структурная модель цифровой платформы системы менеджмента качества, позволяющая автоматизировать рутинные задачи контроля качества, снижая влияние человеческого фактора, и как следствие повышая эффективность всей СМК предприятия.

Преимуществами предложенной структурной модели цифровой платформы системы менеджмента качества являются:

1) повышение эффективности, за счет автоматизации рутинных задач и сокращения времени на обработку данных;
2) снижение сроков принятия решений за счет использования аналитических инструментов;
3) повышение качества продукции, за счет постоянного мониторинга и контроля процессов, позволяющих своевременно выявлять и устранять отклонения;
4) снижение вероятности повторения ошибок за счет автоматизированного внедрения корректирующих и предупреждающих действий;
5) снижение рисков;
6) снижение времени и затрат на обработку рекламаций;
7) снижение затрат на производство за счет оптимизации процессов и сокращения количества дефектов;
8) снижение затрат на подготовку персонала за счет автоматизации процесса обучения;
9) упрощение прохождения аудитов и сертификаций за счет автоматизированного управления документами и процессами;
10) актуальность и соответствие документов, процессов и продукции международным стандартам качества.

В качестве инструментов аналитики и отчетности могут выступать различные чат-боты, основанные на применении искусственного интеллекта и направленые на помощь при выполнении рутинных функций по анализу несоответствий, поиску коренных причин их появления и разработку корректирующих действий.

Поддержка соответствия стандартам предложена в виде реестра внутренней нормативной документации предприятия, которая может включать в себя инструкции, регламенты, положения, стандарты и другие документы, которые определяют порядок выполнения работ, соблюдение стандартов и управление процессами. Реестр представляет собой структурированную, систематизированную базу данных описанной документации. Предложенный реестр облегчит доступ к нужной информации, улучшит контроль за исполнением нормативов и позволит систематизировать работу с документацией.

Управление обучением и развитием персонала в предложенной модели представлено в виде виртуального методического центра компетенций. Виртуальный методический центр компетенций – это онлайн-среда, которая объединяет знания, опыт и ресурсы для обеспечения эффективного функционирования СМК на предприятии. Целью виртуального методического центра компетенций является передача знаний, умений и навыков в области СМК.

В качестве цифрового инструментария для сбора данных, помимо использования датчиков и устройств IoT в реальном времени с производственных линий и других ключевых точек, предложены различные инструменты сбора информации, такие как:

– чат бот «Чек-лист запуска производства»;
– чат бот аудиты качества (5S, продукт, процесс, СМК. оборудование);
– чат бот «Аудит поставщиков»;
– чат бот «Чек-лист запуска производства» и другие.

Взаимосвязь между элементами цифровой платформы системы менеджмента качества играет ключевую роль в обеспечении согласованности процессов, эффективности управления качеством и непрерывного улучшения. Каждый элемент платформы выполняет свою функцию, но при этом тесно связан с другими элементами, обеспечивая целостность системы.

Цифровая платформа СМК включает модули для хранения, управления и обновления документации, такой как стандарты, инструкции, процедуры, внутренние нормативы и регламенты. Обучающие программы и материалы создаются на основе внутренних документов и стандартов, доступных в системе. Сотрудники обучаются процедурам и процессам, регламентированным этими документами.

Модуль управления организацией помогает цифровой платформе СМК автоматизировать и стандартизировать процессы, связанные с управлением качеством. Данные о выполнении процессов собираются и передаются в модули аналитики для мониторинга эффективности и выявления узких мест. Аналитические отчеты влияют на дальнейшие корректировки и оптимизацию процессов. В результате анализа выявляются области для улучшения, после чего инициируются изменения в процессах, что поддерживается документацией и обучением персонала. Аудиторы используют документацию для проверки соответствия процессов установленным стандартам. Отклонения или несоответствия, выявленные в ходе аудита, сопоставляются с документами и записываются в систему для дальнейшего анализа и устранения.

Модули обеспечивающих процессов определяют правила и процедуры управления технологическим оборудованием, инфраструктурой предприятия и человеческими ресурсами, необходимыми для обеспечения высокого качества процессов производства.

Таким образом, каждый элемент системы связан с другими и взаимодействует для поддержания эффективности и высокого уровня качества продукции и процессов.

В основе цифровой платформы СМК лежит централизованная база данных, обеспечивая: обработку и анализ данных, создание отчетных документов, работу с рисками и узкими местами системы, возможность взаимодействия с другими системами и процессами производства для создания единой информационной среды.

Список литературы

1. Васильев В.А. Цифровые технологии в УК / В.А. Васильев, С.В. Александрова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 10. 7 с.

2. Ковригин Е.А., Васильев В.А. Пути развития СМК в условиях цифровизации. М.: Компетентность, 2020. 6 с.

3. Кудрявцев С.С., Матусевич И.Р., Халиулин Р.А. Технологии цифровизации СМК бизнес-процессов предприятия. М.: Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2022. № 4. 6 с.

Савич Екатерина Константиновна, канд. техн. наук, доцент, savich.ek@ssau.ru, Россия, Самара, Самарский университет им. Королева,

Антипов Дмитрий Вячеславович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, antipov.dv@ssau.ru, Россия, Самара, Самарский университет им. Королева

THE STRUCTURAL MODEL OF THE DIGITAL PLATFORM OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

E.K. Savich, D.V. Antipov

The article presents a structural model of the digital platform of the quality management system, which allows to ensure stable quality of supplied products; optimize internal management and production processes; reduce the complexity of processes, procedures and functions for planning, ensuring, controlling and improving quality; reduce risks in the supply of components, raw materials and services, etc.

Key words: quality, model, digital platform, digital tools, quality management system.

Savich Ekaterina Konstantinovna, candidate of technical sciences, docent, savich.ek@ssau.ru, Russia, Samara, Samara National Research University named after S.P. Korolev,

Antipov Dmitry Vyacheslavovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, antipov.dv@ssau.ru, Russia, Samara, Samara National Research University named after S.P. Korolev

УДК 621.9.08
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-177-178

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ НА КИМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

С.М. Никольский

В настоящей статье рассмотрены преимущества и недостатки использования трехмерных моделей при выполнении работ на координатно-измерительных машинах (КИМ). Приведены рекомендации по грамотному интегрированию моделей в программное обеспечение КИМ, описаны способы привязки систем координат модели и детали. Рассмотрены основные нюансы и особенности использования трехмерных моделей в процессе измерений деталей на КИМ.

Ключевые слова: КИМ, трехмерная модель, система координат, стратегия зондирования, привязка.

В процессе контроля геометрических параметров деталей на координатно-измерительных машинах (далее КИМ) возникают ситуации, когда в целях достижения наилучших результатов измерений, оператору необходимо воспользоваться трехмерной моделью исследуемого объекта. Такая необходимость обычно связана с невозможностью контроля каких-либо элементов детали в ручном режиме или же с тем, что при контроле объекта без модели, скорость измерений ниже относительного того, если бы измерения проводились с ее использованием.

Трехмерная или CAD модель (рис.1) — это математическая модель контролируемой детали. Она образуется путем конвертации CAD файла, созданного в программе третьей стороны, представляет деталь с номинальными параметрами и положениями, и может содержать допуски ISO.

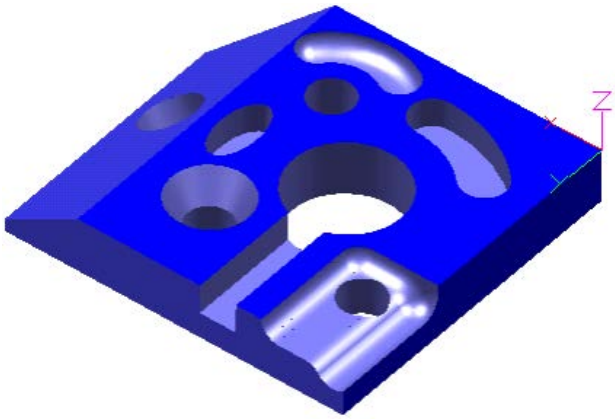


Рис. 1. Трехмерная модель

Применение модели позволяет проводить измерения в полуавтоматическом режиме. Иными словами, оператору необходимо выбрать на модели требуемый для исследования элемент детали, указать стратегию его зонирования (рис.2) или же выбрать расположения точек самостоятельно, а затем лишь подвести измерительный наконечник в нужное место, все остальное КИМ выполнит в автоматическом режиме [1].

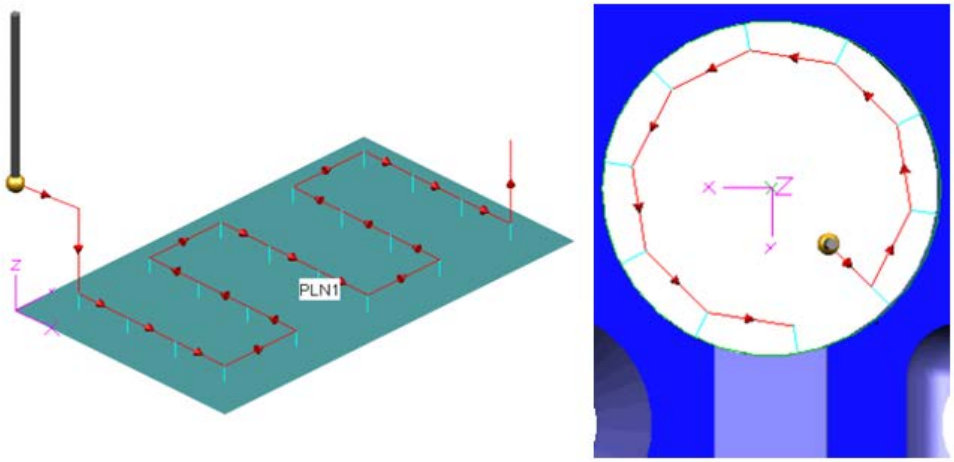


Рис. 2. Стратегии зондирования

Удобство использования моделей заключается в просторе их импорта в программное обеспечение КИМ. Данные модели, как упоминалось выше могут быть разработаны в различных, направленных на это программах, с возможностью сохранение в широком перечне форматов:

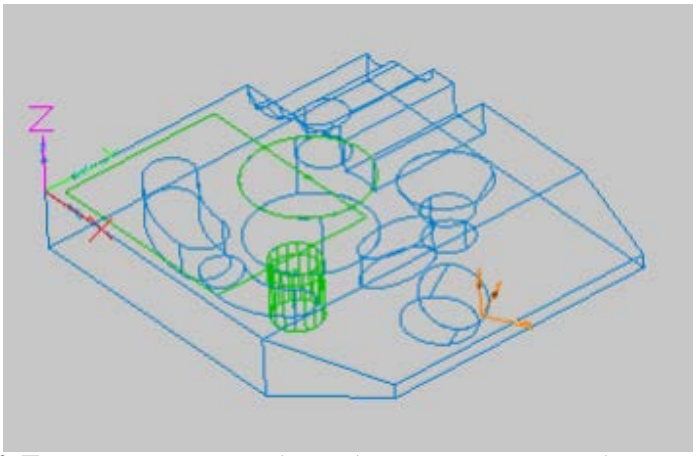


Рис. 3. Привязка системы координат детали к системе координат модели

Однако, для того, чтобы воспользоваться преимуществами CAD моделей, необходимо правильно интегрировать их в измерительную программу КИМ, что не всегда является достаточно быстрой и простой процедурой. Как известно, любые автоматические измерения на КИМ невозможны без создания локальной системы координат. Благодаря ей, подвижные части КИМ перемещаются по строго заданным координатам и происходит оценка контролируемых параметров. Способов создания систем координат существует достаточно много, подробно они описаны в

статье [2]. Их формирование предполагает измерение "базовых" элементов исследуемой детали для более точного ее позиционирования. В случае с работой по трехмерной модели, перед проведением непосредственно измерений, система координат формируется дважды. В первом случае это нужно для определения положения контролируемой детали в рабочем пространстве КИМ, во втором случае для привязки измеренных базовых элементов к системе координат модели (рис.3). Процесс привязки не всегда прост, как может показаться, ведь необходимо учитывать тот факт, что система координат трехмерной детали может отличаться от той, которую выбирает оператор, учитывая "базовые" измеренные элементы.

Как следствие, при создании CAD модели контролируемой детали необходимо учитывать положение элементов, участвующих в формировании системы координат. Следование этой рекомендации в последствии позволит избежать неточностей при привязке двух систем координат друг к другу (рис.4).

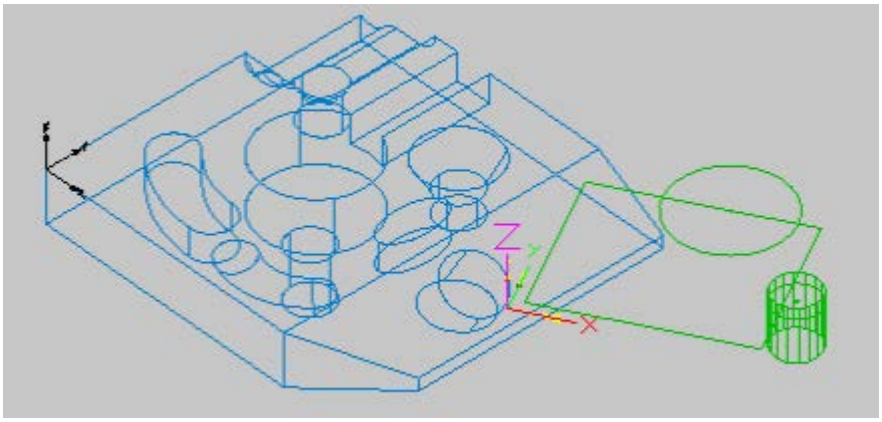


Рис. 4. Неправильный вариант привязки двух систем координат

Использование трехмерных моделей при проведении измерений на КИМ бесспорно является серьезным преимуществом, однако учитывая условия той или иной поставленной измерительной задачи, решение о целесообразности их применения всегда остается за оператором.

Список литературы

1. Никольский С.М. Измерение типовых геометрических элементов на КИМ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 521-523.

2. Никольский С.М. Способы создания локальной системы координат при измерениях на КИМ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 3. С. 418-420.

Никольский Сергей Михайлович, начальник лаборатории координатно-измерительных машин, nikolsky.serge@yandex.ru, Россия, Тула, АО «АК «Туламашзавод»

PECULIARITIES OF MEASUREMENTS AT KIM WITH APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL MODELS OF INVESTIGATED OBJECTS

S.M. Nikolsky

This article considers the advantages and disadvantages of using three-dimensional models when performing work on coordinate measuring machines (CMM). Recommendations on competent integration of models into the CMM software are given, methods of linking the coordinate systems of the model and the part are described. The key nuances and features of using 3D models in CMM part measurement are covered.

Key words: CMM, three-dimensional model, coordinate system, probing strategy, georeferencing

Nikolsky Sergey Mikhailovich, head of the Coordinate Measuring Machine Laboratory, nikolsky.serge@yandex.ru,Russia, Tula, JSC "Tulamashzavod"

УДК 658.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-180-181

МЕТОДИКА РАСЧЁТА НОРМАТИВОВ НАКОПЛЕНИЯ (ОБРАЗОВАНИЯ) ОТХОДОВ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОМПЛЕКСА ТЕХНОЛОГИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ИХ ПЕРЕРАБОТКУ (НА МАТЕРИАЛАХ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН)

Т.А. Мустафаев, С.А. Трифонов

В статье представлены авторские умозаключения по вопросу утилизации отходов и созданию методики расчёта нормативов образования отходов, в зависимости от комплекса технологий, применяемых на их дальнейшую переработку (на материалах Республики Татарстан). Цель научной статьи – обосновать новую методику расчёта нормативов накопления отходов, в зависимости от комплекса технологих применяемых на их переработку. Научная новизна исследования: представлены математические формулы, применяемые при утилизации отходов; разработаны основные положения методики расчёта нормативов накопления отходов; визуализированы современные технологии, применяемые для переработки отходов. Перспективы своих дальнейших исследований автор связывает с изучением методов машинного обучения на этапах жизненного цикла образования отходов.

Ключевые слова: отходы, утилизация, методика, нормативы, расчет, технологии.

На региональном уровне остро обсуждается вопрос утилизации отходов, так как данный аспект входит в ТОП-10 проблем Республики Татарстан (далее - РТ). Методика расчёта нормативов накопления отходов, в зависимости от комплекса технологий, применяемых на их переработку, играет важную роль в обеспечении эффективной и устойчивой системы управления отходами. Понимание того, какие технологии применяются для переработки отходов, и как они могут влиять на количество накапливаемых отходов, является ключевым аспектом при разработке стратегии управления отходами. Для определения нормативов накопления отходов, в зависимости от комплекса технологий, применяемых на их переработку, необходимо учитывать не только тип отходов, но и способ их обработки. Разработка системы расчёта нортативов должна учитывать эффективность технологий, степень переработки отходов и возможность их дальнейшего использования.

Цель научной статьи – обосновать новую методику расчёта нормативов накопления отходов, в зависимости от комплекса технологий применяемых на их переработку. Задачи исследования: представить математические формулы, применяемые при утилизации отходов; разработать основные положения методики расчёта нормативов накопления отходов; визуализировать современные технологии, применяемые для переработки отходов.

Обзор литературных источников показал заинтересованность учёных разных стран в решении проблемы утилизации отходов при помощи современных технологий. Среди передовых работ следует отметить вклад следующих учёных: Бугоркова А.А. отметила утилизацию твёрдых бытовых отходов, как социально-экологическую проблему региона [1, С. 19-23]; Вакарёв А.А., Виноградов В.В. изучили обеспечение экологической безопасности, путём развития мусороперерабоки в современной России на региональном уровне [2, С. 10-37]; Едронова В.Н. провела анализ состояния и охраны окружающей среды в Нижегородской области [3, С. 891-910]; Ермоленко О.Д., Буйлук П.А. изучили проблемы экономики и экологии, их взаимосвязи в региональной системе (на примере Ростовской области) [4, С. 95-98]; Ключникова Е.М., Орлов А.Н., Корппоо А.М. показали индустрию переработки твёрдых коммунальных отходов, на пути к «зелёному» росту [5, С. 67-88]; Минин И.Л., Минин Д.Л. показали корректировку методики распределения субсидий бюджета Новгородской области между муниципальными образованиями на утилизацию отходов [6, С. 71-74]; Никанорова А.А., Манвелова А.Б. провели анализ управления потоками отходов в странах региона Балтийского моря [7, С. 33-41]; Нуреев Р.Р., Сыщикова Т.Л. представили вариант решения проблемы обращения с твёрдыми коммунальными отходами, как элемент ESG-стратегии [8, С. 83-91]; Петров Н.В. выполнил геоэкологическую оценку опыта обращения с ТКО в урбанизированном регионе Российской Федерации [10, С. 90-96]; Пономарева С.В., Каменских Д.Н. изучили рециклинг отходов от осуществления основных бизнес-процессов промышленными предприятиями [11, С.80-86]; Трещевский Ю.И., Ибрагимхалилова Т.В., Малугина Е.Г. показали состояние и перспективы эколого-социо-экономического развития регионов Цетрального Черноземья [13, С. 28-40]. Другие авторы научных трудов, в области утилизации отходов на региональном уровне, в статье не рассматривались.

Основные результаты исследований. В современном мире существует множество различных технологий для переработки отходов, каждая из которых имеет свои особенности и последствия для окружающей среды и людей. Некоторые технологии, такие как пиролиз и газификация, направлены на конвертацию отходов в топливо и газ, что позволяет снизить объём накапливающихся отходов в окружающей среде. Использование биопластиков и биополимеров также способствует уменьшению объёма пластиковых отходов, поскольку они биоразлагаемы и могут быть обработаны природными естественными процессами. Технологии обработки осмоса и химической переработки пластика играют важную роль в очистке и повторном использовании воды и других отходов соответственно. Путём переработки отходов вторичного сырья, таких как: стекло; металл; пластик и прочее, можно существенно сократить количество производимых отходов и повторно использовать эти материалы.

В нормативно-правовых актах Российской Федерации представлены следующие методы, которые представляют возможность произвести расчёт нормативов отходов:

-расчёт нормативов накопления отходов методом измерения их количества [12];

-расчёт нормативов накопления отходов методом сравнительного анализа [];

-определение нормативов накопления с учётом данных о массе отходов [12];

-расчёт среднего накопления для крупногабаритных отходов [12];

-определение расчётного количества отходов [12];

-особый режим накопления отходов до принятия современных положений [12].

Рассмотрим финансирование Республики Татарстан в части утилизации отходов с территории 21 района РТ и Казани [9].

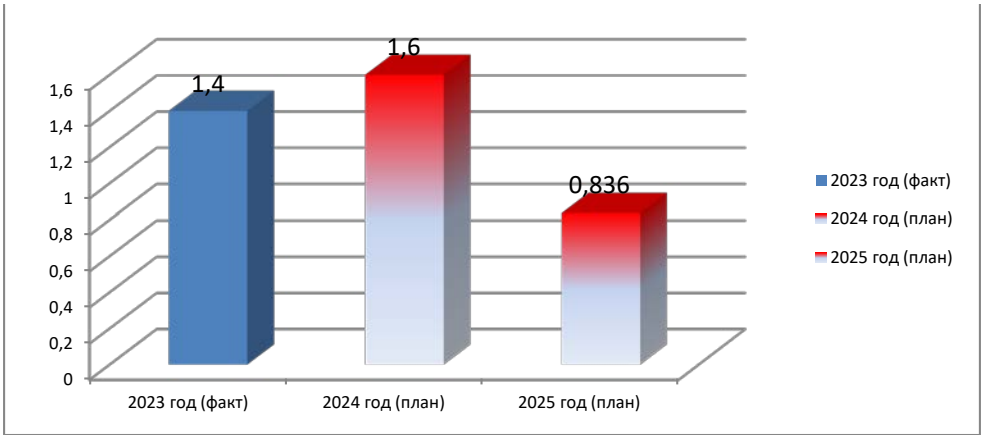


Рис. 1. Финансирование утилизации отходов в РТ с 2023-2025 гг.

Из данных, представленных на рисунке 1 следует, что проблема с утилизацией отходов в РТ решается на недостаточном уровне, так как объём финансирования значительно сократиться в плановом 2025 г. – 836 млн. руб., по сравнению с 2023 г. – 1,4 млрд.руб. и 2024 г. – 1,6 млрд. руб. [9].

Представим в табличной форме авторские формулы, которые могут быть применены на практике (см. табл. 1).

Таблица 1

Математический инструментарий, необходимый для определения нормативов утилизации отходов

№ п.п.	Наименование формулы	Формула расчёта	Необходимы пояснения к формуле
1	Формула рециклинга отходов	Ро = С+О+П	Ро-рециклинг отходов; С-сортировка отходов; О – очистка отходов; П – переработка отходов.
2	Формула компостирования отходов	Ко = ООП+В+Вл	Ко – компостирование отходов; ООП – отходы органического происхождения; В – воздух; Вл – влага.
3	Формула пиролиза	П(ТТ+Г) =От+ВТбдк	П – пиролиз; ТТ – твёрдое топливо; Г – газ; От – отходы; ВТбдк – высокая температура без доступа кислорода.
4	Формула биогазовой установки	ООП+Ф=Б+У	ООП – отходы органического происхождения; Ф – ферментация; Б – биогаз; У – удобрение.
5	Формула пресования отходов	От+Сж = Обум+Тот	От – отходы; Сж – сжатие отходов (под прессом); Обум – уменьшение объёма отходов; Тот – транспортировка отходов.

Представив математический инструментарий (см. табл. 1), перейдём к основным положениям методики расчёта нормативов образования отходов, в зависимости от комплекса технологий, применяемых на их дальнейшую переработку (см. табл. 2).

Таблица 2

Основные положения методики расчёта нормативов образования отходов, в зависимости от комплекса технологий, применяемых на их дальнейшую переработку

№ п.п.	Основные положения методики	Содержание положений методики
1	Цель методики	Расчёт нормативов образования отходов, в зависимости от комплекса технологий
2	Задачи методики	1. Применение современных технологий для переработки отходов; 2. Расчёт эффективности применения современных технологий переработки отходов;
3	Инструментарий методики	Экономико-математический инструментарий
4	Выбор технологий обработки отходов	Расчёт нормативов будет зависеть от используемой технологии.
5	Оценка эффективности методики	Выявление существенных отклонений в методике расчёта нормативов образования отходов. Расчёт эффективности применения каждой технологии переработки отходов.
6	Апробация методики	На территории Республики Татарстан
7	Методы оценки	Геоэкологическая оценка; Экономическая оценка.

Методика расчёта нормативов образования отходов, в зависимости от комплекса технологий, применяемых на их дальнейшую переработку, представленная в таблице 2 позволяет определить отклонения и определить эффективность мероприятий.

Целесообразно отметить, что в зависимости от комплекса технологий, применяемых на переработку отходов, могут быть установлены различные нормативы. Если для переработки отходов используется технология об-

работки осмоса, то нормативы на образование отходов будут рассчитываться иначе, чем при использовании биотехнологий или химических методов (см. рис.2).



Рис. 2. Современные технологии, применяемые для переработки отходов [составлено автором лично]

Представленные на рисунке 2 современные технологии, которые могут быть применены для переработки отходов играют важную роль в снижении количества отходов, их переработке и повторному использованию, что способствует улучшению экологической ситуации и эффективному использованию ресурсов.

Заключение. Методика расчёта нормативов образования и накопления отходов зависит от комплекса технологий, применяемых на их переработку, и, позволяет оптимизировать процессы, минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. В результате проведённых исследований автор приходит к следующим выводам:

-во-первых, объём финансирования вывоза мусора сокращается, что только усугубит ситуацию с отходами;

-во-вторых, представлен математический инструментарий, позволяющий вычислять отходы;

-в-третьих, разработаны основные положения методики расчёта нормативов образования отходов;

-в-четвёртых, представлены современные технологии, которые позволяют утилизировать отходы с меньшим вредоностным влиянием на окружающую среду.

Перспективы своих дальнейших исследований автор связывает с изучением методов машинного обучения на этапах жизненного цикла образования отходов.

Список литературы

1.Бугоркова А.А. Утилизация твёрдых бытовых отходов, как социально-экологическая проблема региона // В сборнике: Сборник тезисов докладов отчетной научно-практической конференции «шаг в науку». Сборник тезисов докладов отчетной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 19-23.

2.Вакарёв А.А., Виноградов В.В. Обеспечение экологической безопасности, путём развития мусороперерабатки в современной России: развитие, сложности, решение на региональном уровне // Национальная безопасность / Nota Bene. 2022. № 2. С. 10-37.

3.Едронова В.Н. Анализ состояния и охраны окружающей среды в Нижегородской области // Экономический анализ: теория и практика. 2022. Т. 21. № 5 (524). С. 891-910.

4.Ермоленко О.Д., Буйлук П.А. Экономика и экология: проблемы взаимосвзи в региональной системе (на примере Ростовской области) // В сборнике: Экология и безопасность жизнедеятельности. Сборник статей XXII Международной научно-практической конференции. Под редакцией В.А. Селезнева, И.А. Лукшина. Пенза, 2022. С. 95-98.

5.Ключникова Е.М., Орлов А.Н., Корппоо А.М. Индустрия переработки твёрдых коммунальных отходов, на пути к «зелёному» росту // ЭКО. 2022. № 8 (578). С. 67-88.

6.Минин И.Л., Минин Д.Л. Корректировка методики распределения субсидий бюджета Новгородской области между муниципальными образованиями на утилизацию отходов // Известия Международной академии аграрного образования. 2023. № 64. С. 71-74.

7.Никанорова А.А., Манвелова А.Б. Анализ управления потоками отходов в странах региона Балтийского моря // Успехи современного естествознания. 2023. № 5. С. 33-41.

8.Нуреев Р.Р., Сыщикова Т.Л. Решение проблемы обращения с твёрдыми коммунальными отходами, как элемент ESG-стратегии // Вестник Международного института рынка. 2023. № 1. С. 83-91.

9.Официальный сайт госзакупок // [Электронный ресурс] URL: www.garant.ru (дата обращения: 17.07.2024).

10. Петров Н.В. Геоэкологическая оценка опыта обращения с ТКО в урбанизированном регионе Российской Федерации // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 2-1 (89). С. 90-96.

11. Пономарева С.В., Каменских Д.Н. Рециклинг отходов от осуществления основных бизнес-процессов промышленными предприятиями // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2024. № 2-1. С.80-86.

12. Постановление Правительства РФ от 26 августа 2023 г. № 1390 «О порядке определения нормативов накопления твёрдых коммунальных отходов…..» (далее текст) // Информационно-правовой портал Гарант.ру // [Электронный ресурс] // URL: http.www.garant.ru (дата обращения: 17.07.2024).

13. Трещевский Ю.И., Ибрагимхалилова Т.В., Малугина Е.Г. Состояние и перспективы эколого-социо-экономического развития регионов Цетрального Черноземья // Регион: системы, экономика, управление. 2023. № 2 (61). С. 28-40.

Мустафаев Тимур Азисович, ассистент, project_office@internet.ru, Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,

Трифонов Сергей Алексеевич, студент, Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

METHODOLOGY FOR CALCULATING STANDARDS FOR WASTE ACCUMULATION (FORMATION), DEPENDING ON THE COMPLEX OF TECHNOLOGIES APPLIED FOR THEIR PROCESSING (BASED ON MATERIALS OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN)

The article presents the author's conclusions on the issue of waste disposal and the creation of a methodology for calculating waste generation standards, depending on the set of technologies used for their further processing (based on materials from the Republic of Tatarstan). The purpose of the scientific article is to substantiate a new methodology for calculating waste accumulation standards, depending on the complex of technologies used for their processing. Scientific novelty of the research: mathematical formulas used in waste disposal are presented; the main provisions of the methodology for calculating waste accumulation standards have been developed; modern technologies used for waste processing are visualized. The author associates the prospects for his further research with the study of machine learning methods at the stages of the life cycle of waste generation.

Key words: waste, recycling, methodology, standards, calculation, technology.

Mustafaev Timur Azisovich, assistant, project_office@internet.ru, Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after V.I. A.N. Tupolev-KAI,

Trifonov Sergey Alekseevich, student, Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after V.I. A.N. Tupolev-KAI

УДК 621.9.08
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-183-184

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ НЕТИПОВЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КИМ

С.М. Никольский

В настоящей статье рассмотрены основные нетиповые геометрические элементы, подвергающиеся контролю на КИМ. Выполнен обзор двух режимов измерений, их особенности и возможности. Рассмотрены примеры выполнения измерений некоторых геометрических элементов с применением КИМ как в ручном, так и в автоматическом режиме. Даны рекомендации по выполнению измерений, с учетом конструкционных особенностей представленных геометрических элементов детали. Продемонстрированы способы редактирования измерительного пути автоматического режима измерений КИМ.

Ключевые слова: КИМ, измерения, автоматический режим, точки, сечения, геометрические элементы.

В процессе эксплуатации КИМ, от оператора данного СИ требуется выполнять контроль тех или иных геометрических параметров изделия. Для этой задачи приходится измерять как привычные геометрические элементы, так и совсем нетиповые. К наиболее распространенным нетиповым элементам относятся – слот, тор, прямоугольник, шестиугольник, эллипс и т.д.

Измерения таких элементов можно разделить на ручные и автоматические. Их отличие состоит в том, что при ручном измерении оператор самостоятельно управляет измерительной головкой и зондирует поверхность элемента в определенных участках. Данный способ является достаточно эффективным при контроле не особо точных размеров, т.к. при таком измерении появляется погрешность, связанная с действиями оператора.

При автоматическом измерении подобные недостатки отсутствуют, т.к. оператор задает траекторию измерений в соответствии с параметрами геометрического элемента, используя специальный функционал программного обеспечения КИМ [1].

Тор. При измерении тора как в ручном, так и в автоматическом режиме необходимо определить три различных окружности на его поверхности (рисунок 1,2).

Измерение данного элемента предполагает выбор правильного положения измерительного наконечника для минимизации его возможного проскальзывания.

Прямоугольник. Измерение прямоугольника рекомендуется выполнять по следующей схеме (рис. 3).

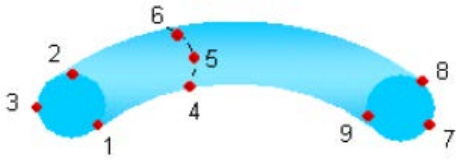


Рис.1. Стратегия измерения тора

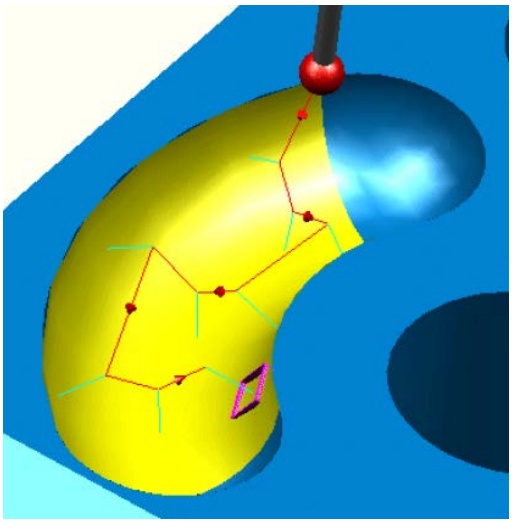


Рис. 2. Стратегия измерения тора в автоматическом режиме

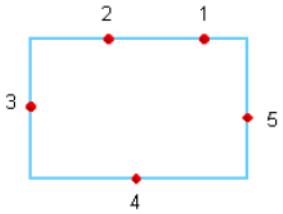


Рис.3. Стратегия измерения прямоугольника

При выборе плоскости проекции следует учитывать, что первые две точки должны располагаться на одной и той же стороне. Измерения в автоматическом режиме позволяют выполнять гибкую настройку измерительного пути. В том случае, если при измерении прямоугольника на измерительном пути встречается препятствие, например паз, то путь может быть отредактирован, в соответствии с особенностями измеряемого элемента (рисунок 4).

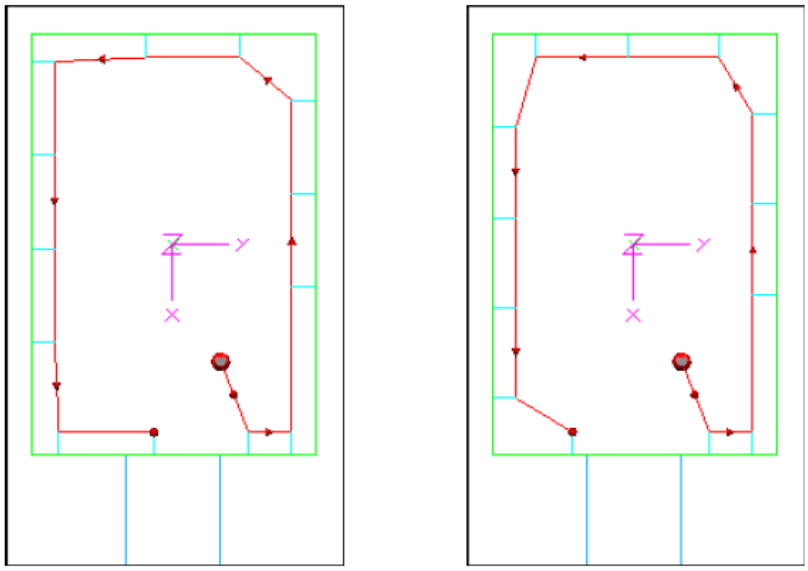


Рис.4. Редактирование измерительного пути прямоугольника

Слот. Стратегия измерения слота аналогична измерениям вышеупомянутого прямоугольника. При выборе плоскости проекции, две первых точки располагают на одной стороне (рисунок 5).

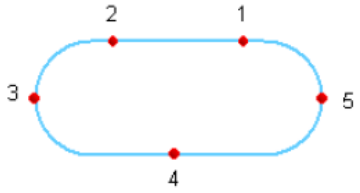


Рис. 5. Стратегия измерения слота

Эллипс. Элемент, измерение которого предполагает зондирование поверхности в нескольких точках, причем первые две точки должны быть измерены на максимальном расстоянии друг от друга, а следующие две точки – на наименьшем расстоянии друг от друга, согласно схеме, представленной на рисунке 6.

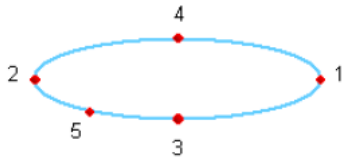


Рис. 6. Стратегия измерений эллипса

Шестиугольник. Данный геометрический элемент имеет наименьшее распространение среди всех вышеуказанных элементов, однако встречаются детали, где так или иначе такая фигура подлежит измерениям. При выбранной плоскости проекции, первые две точки располагаются на одной стороне, а все последующие на каждой образующей (рисунок 7).

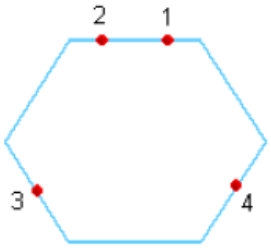


Рис. 7. Стратегия зондирования шестиугольника

Применение данных рекомендаций при выполнении ответственных измерений способствует минимизации влияния погрешностей, связанных с деятельностью оператора, позволяет определять представленные элементы детали в полном соответствии с их действительным положением и размерами, избегая больших погрешностей формы.

Список литературы

1. Никольский С.М. Измерение типовых геометрических элементов на КИМ. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №11. С. 521-523.

Никольский Сергей Михайлович, начальник лаборатории координатно-измерительных машин, nikolsky.serge@yandex.ru, Россия, Тула, АО «АК «Туламашзавод»

RECOMMENDATIONS FOR MEASURING NON-STANDARD GEOMETRICAL ELEMENTS ON A CMM

S.M. Nikolsky

This paper discusses the main non-typical geometric features that are inspected on a CMM. Two measurement modes, their features and capabilities are reviewed. Examples of measuring some geometric features using CMMs in both manual and automatic modes are discussed. Advice is given on how to take measurements, taking into account the design features of the geometrical features presented. Methods of editing the measuring path of automatic mode of CMM measurements are demonstrated.

Key words: CMM, measurement, automatic mode, points, sections, geometrical elements.

Nikolsky Sergey Mikhailovich, head of the Coordinate Measuring Machine Laboratory, nikolsky.serge@yandex.ru,Russia, Tula, JSC"Tulamashzavod"

УДК 625.144.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-186-187

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГАБАРИТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ И ПАССАЖИРСКИХ ОБУСТРОЙСТВ

И.А. Сафронова, Т.В. Харитонова

В статье рассмотрены способы измерения габарита платформ, авторами предложено автоматизированная система габаритного контроля и мониторинга состояния железнодорожных платформ и устройство. Данная система позволит перейти от текущей модели к цифровой, что позволит более эффективно осуществлять эксплуатацию пассажирских платформ, осуществлять планирование и контроль проведения текущего и капитального ремонтов, предотвращать аварийные ситуации и сократить затраты на обслуживание.

Ключевые слова: автоматизированная система, габарит платформы, железнодорожная инфраструктура, дальномер, угломер.

Введение. Основными задачами повышения эффективности железнодорожной инфраструктуры является повышение надежности перевозочного процесса, снижение технологических рисков, предупреждение аварийных ситуаций и травматизма, а также снижение экономических затрат на обслуживание и ремонт.

Железнодорожная пассажирская платформа включена в состав железнодорожной инфраструктуры и играет не малую роль в части обеспечения безопасности пассажиров. Поэтому есть большая необходимость в периодических контрольных измерениях габаритов платформ железных дорог.

Эксплуатация пассажирских железнодорожных платформ тесно связана с необходимостью осуществления периодических контрольных измерений габаритных геометрических параметров. Другими словами, данные параметры называют габарит приближения строений. Проведение периодических замеров связано со значительными временными и трудовыми затратами. В настоящее время для проведения таких замеров в структурных подразделениях работниками производственных участков используются следующие средства и приборы, к ним относятся:

- рулетки измерительные металлические;
- отвесы металлические строительные;
- шаблон измерения габарита платформы УШГ;
- дальномеры.

Измерительные рулетки представляют собой корпус с механизмом наматывания и металлической лентой, имеют значительную погрешность, при измерении требуется несколько человек и измерения занимают значительную часть времени. Смысл измерения заключается в том, что полученные значения сравнивают со шкалой. С помощью них измеряют длину и ширину пассажирских платформ. Измерение габарита платформы требует использования дополнительных методов (расчетных формул). Работоспособность рулеток возможна только при температуре окружающего воздуха от - 40 до + 50 °С. Достаточно долгий процесс измерения габарита платформы с помощью данного способа.

Отвесы металлические строительные используются для определения прямолинейности и отклонения от плоскостности. Процесс измерения заключается в следующем:

- свободный конец отвеса прикрепляется к краю поверхности платформы;
- конец отвеса должен касаться земли;
- при помощи линейки измеряется расстояние.

Данный процесс достаточно трудоемкий и имеет незначительную погрешность при измерении.

Шаблон предназначен для измерения габарита платформ в прямых участках от оси пути и в кривых от внутренней грани головки рельса. Данная конструкция достаточно сложна и включает в себя лапки с изолятором, вертикальный отвес с измерительной линейкой и ползун с регулировочным винтом. Процесс трудоемкий, принцип действия - механический. Данный способ является наиболее затратным по времени и требует участия нескольких работников одновременно. Шаблон предназначен для измерения габарита платформ в прямых участках от оси пути и в кривых от внутренней грани головки рельса.

Принцип работы дальномера основан на измерении времени прохождения импульса лазерного излучения до объекта и обратно. Дальномер представляет собой пыле- и влагозащищенный моноблочный корпус, вмещающий оптические и электронные компоненты. Для определения габарита опоры проводится два измерения: 1 – измеряется расстояние от оси пути до борта платформы, 2 – измеряется расстояние от уровня головки рельса до края поверхности платформы, затем при помощи формул производится расчет. Недостатком дальномера является использование внешнего источника питания или аккумулятора, что позволяет производить работу только ограниченное время. Дополнительно с собой нужно иметь штатив, на который крепится дальномер. Достоинством данного метода является скорость измерения и малая затрата времени.

Инновационная составляющая проекта. Все используемые способы определения габарита имеют значительные недостатки и неудобства проведения измерений, поэтому необходимо создание удобной, простой и многофункциональной системы, которая позволит сократить время измерений, повысить качество измерений, снизить человеческий фактор и самое главное – это сократить погрешность измерений.

Предлагается автоматизированная система габаритного контроля и мониторинга состояния платформ. Данная система может быть использована для определения габарита платформы как высокой, так и низкой.

Предлагаемая система проста в использовании, не требует дополнительных данных и знаний.

Основной задачей данной системы является автоматизированный сбор и обработку актуальных данных по замерам габаритов пассажирских железнодорожных платформ и конструкций, а также мониторинг их технического состояния (проведение технического обслуживания и текущего ремонта) в целях создания единой базы данных объектов контроля для заинтересованных структур.

Измеритель состоит из путевого шаблона, угломера с лазерной разметкой, мобильный телефон с ПО.

Мобильное приложение позволяет моментально передавать информацию (при наличии доступа сети Интернет) или сгружать информацию после проведения всех контрольных замеров. По количеству проведенных замеров ограничений нет, памяти достаточно для использования в течение года.

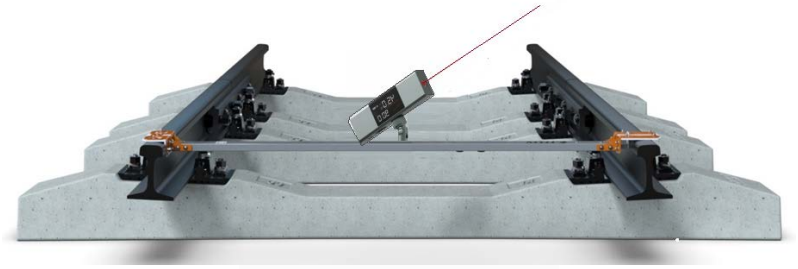


Рис. 1. 3D модель измерителя

Полученную информацию также можно передать на компьютер через кабель USB или флешнакопитель, предусмотренный телефоном.

Данное устройство объединяет в себе практически все традиционные способы измерения, что в результате снижает погрешность, человеческий фактор и сокращает время измерения. Устройство гарантирует высочайшую степень точности измерений (± 0,5°).

В качестве основания прибора принят обычный путевой шаблон, к которому крепится угломер с лазерной разметкой. В качестве угломера предлагается угломер с лазерной разметкой Xiaomi Duka LI 2 in 1 Dual Laser, он выполняет одновременно две функции – измерение угла и измерение луча лазера.

В системе возможно и использование других типов угломеров, другие модели уступают данной в стоимости, функциональных возможностях, практичности и простоте использования.

Вес прибора незначителен, компактен, что позволяет использовать его даже работнику с небольшим опытом измерений. Для проведения измерений достаточно одного человека.

При проведении замеров путевой шаблон необходимо установить как обычно - перпендикулярно рельсу и расположить упоры на головки рельсов. Угломер автоматически подбирает угол таким образом, чтобы луч лазера упирался в край поверхности платформы. Полученная информация выводится на индикатор угломера и при помощи работника заносится в приложение на смартфоне. Зная угол и длину луча приложение на телефоне позволяет определить координаты точек измерения и произвести расчет необходимых характеристик габарита платформы с привязкой к месту снятия показаний. Полученная информация передается на основной компьютер по сети Интернет.

С помощью ПО производится моментальный расчет и полученные величины габаритов сравниваются с предыдущими замерами, а также с замерами по ГОСТу.

На основном компьютере происходит сбор всех полученных данных, где автоматически будет сформирован цифровой протокол проведенных измерений, калибровки, поверки и др.

С работой на компьютере достаточно одного человека, программное обеспечение простое в эксплуатации и логически правильно построенное.



Рис. 2. Структурная схема автоматизированной системы габаритного контроля и мониторинга состояния платформ

На основе полученной информации делается заключение о пригодности и дальнейшего использования, а также формируется прогноз состояния. Это позволит предупредить внезапный выход из строя (изменение конструкции, размеров), предупредить аварийные и предаварийные ситуации, а также снизить риск травматизма.

Структурная схема автоматизированной системы представлена на рисунке 2.

Заключение. Использование системы экономит время, затрачиваемое на процесс измерения, минимизирует участие в замерах человека, что в итоге снижает погрешность общих измерений.

Внедрение автоматизированной системы позволит перейти от текущей модели к цифровой, что позволит более эффективно осуществлять эксплуатацию пассажирских платформ, осуществлять планирование и контроль проведения текущего и капитального ремонтов, предотвращать аварийные ситуации и сократить затраты на обслуживание на 15-20%.

Список литературы

1. О железнодорожном транспорте в Российской Федерации : Федер. закон от 10 янв. 2003 г. № 17-ФЗ : (ред. от 03.08 2018 г.) // СПС «КонсультантПлюс». С. 68
2. Об утверждении технического регламента о безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта: постановление Правительства РФ от 15.07.2010 г. № 525. [Электронный ресурс]. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/98808 (дата обращения: 16.01.2024).
3. Богданов В.М. Использование габаритных возможностей сети для повышения провозной способности // Увеличение габаритов и повышение погонных нагрузок грузовых вагонов: сб. науч. тр. ВНИИЖТ. М.: Транспорт, 1983. Вып. 660. С. 4−17.
4. Патент 214940 РФ. Устройство для измерения габаритных характеристик объекта / Д.А. Голуб. Опубл. 22.11.2022. Бюл. №33.
5. Патент 220709 РФ. Измеритель габарита приближения строений электронный ручной/ Л.А. Афанасьев, В.И. Сиротин, В.Г. Сафин, А.А. Уманский С.М. Шевяков. Опубл. 28.09.2023. Бюл. №28.
6. Патент 2747047 РФ. Лазерный инклинометр/ Ю.А. Будагов, М.В. Ляблин. Опубл. 23.04.2021. Бюл. 12.
7. Тушев С.А., Суховилов Б.М. Алгоритм полиномиальной сложности для поиска соответствующих точек на основе эпиполярной геометрии // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7. № 4. С. 83-104.
8. Габаритный контроль пассажирских обустройств [электронный ресурс] / https://innovation.rzd.ru/Ex/Claim/View/168 (дата обращения: 02.01.2024).
9. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method // Journal of the American Statistical Association. 1949. Vol. 44. № 247. PP. 335-341.
10. Tushev S., Sukhovilov B., Sartasov E. Robust coded target recognition in adverse light conditions / Proceedings-2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018.

Сафронова Ирина Анатольевна, старший преподаватель, efremovaia1992@gmail.com, Россия, Самара, Самарский государственный университет путей сообщения,

Харитонова Татьяна Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, boshkareva@samgups.ru, Россия, Самара, Самарский государственный университет путей сообщения

IMPROVEMENT OF MEASUREMENTS OF DIMENSIONS OF RAILWAY INFRASTRUCTURE AND PASSENGER EQUIPMENT

I.A. Safronova, T.V. Kharitonova

The article discusses methods for measuring the dimensions of platforms; the authors propose an automated system for dimensional control and monitoring of the condition of railway platforms and a device. This system will allow you to move from the current model to a digital one, which will allow you to more efficiently operate passenger platforms, plan and control current and major repairs, prevent emergencies and reduce maintenance costs.

Key words: automated system, platform dimensions, railway infrastructure, range finder, inclinometer.

Safronova Irina Anatolievna, senior lecture, efremovaia1992@gmail.com, Russia, Samara, Samara State Transport University

Kharitonova Tatiana Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, head of chair, boshkareva@samgups.ru, Russia, Samara, Samara State Transport University

УДК 658.56
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-188-189

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Д.В. Усачев

В данной статье на основе анализа существующих подходов к классификации факторов, влияющих на качество образцов авиационной техники, все факторы разделены на три группы: внутренние, внешние, человеческие. Основное внимание в работе направлено на рассмотрение внешних факторов. Среди внешних факторов выделены такие как: политические, экономические, рыночные, технологические, конкурентные, международные. Критериями оценки внешних факторов выбраны: уровень влияния, вероятность наступления события, направленность влияния, которые сведены в расчетную таблицу. В качестве примера выбран один из показателей качества среднемагистрального пассажирского самолета МС-21, его масса. На основании проведенных расчетов экспертными методами сделаны выводы о влиянии внешних факторов на массу МС-21.

Ключевые слова: влияние внешних факторов, критерии оценки, экспертный метод, показатель качества, масса самолета.

Качество авиационной техники имеет решающее значение для функционирования и развития предприятий авиационной промышленности. Только производство высококачественных изделий гарантирует компании надежность и долговечность своей продукции, что, в свою очередь, привлекает клиентов и способствует увеличению

прибыли. Авиационное предприятие, уделяющее особое внимание качеству выпускаемой авиационной техники, получает преимущество на рынке и укрепляет свою позицию среди конкурентов.

Вместе с тем на качество авиационной техники влияет множество различных факторов. На этапе проектирования авиационной техники основное внимание следует уделять факторам, определяющим общее качество. Исследования показывают, что именно они обеспечивают до 80% влияния на конечный результат. Контроль и регулирование технологических процессов, играющие важную роль, вносят лишь 15% в качество. Наконец, контроль качества готовой продукции имеет минимальное значение - всего 5%. Это подчеркивает необходимость фокусировки на начальных этапах разработки.

Анализ подходов к классификации факторов, влияющих на уровень качества продукции, в учебных пособиях Е.О. Ермолаевой, Н.С. Сачко и Г.И. Шевелёвой, а также научных статей Е.А. Шацких и И.А. Князевой, позволяет представить деление всех факторов на три основные группы: внутренние, внешние, человеческие (рис.1) [1,2]. Внутренние факторы, влияющие на качество продукции обусловлены внутренней средой, в которой происходит производство (эксплуатация) продукции, а внешние характеризуются тем, что предприятие, производящее продукцию, не может на них повлиять. Человеческий фактор является субъективной составляющей, влияющей на уровень качества продукции, определяемый компетентностью специалистов.

В рамках предложенной статьи проанализированы только внешние факторы, влияющие на качество авиационной техники, и предложен способ их оценки.

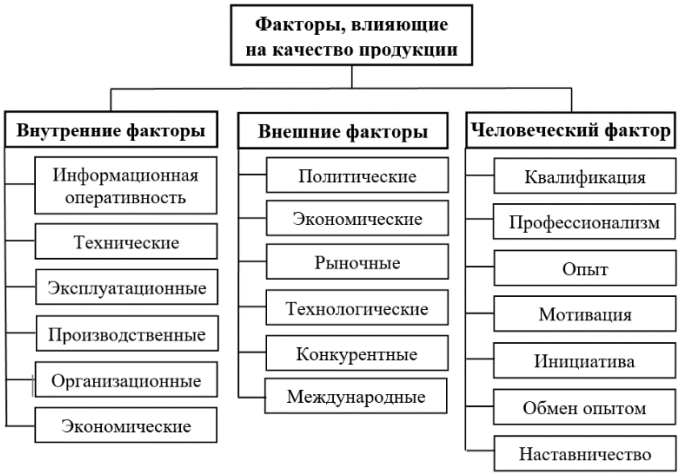


Рис. 1. Факторы, влияющие на качество продукции (авиационной техники)

Качество авиационной техники зависит от множества внешних факторов, которые можно разделить на несколько категорий:

1. Политические факторы, под которыми понимается:

- государственное регулирование (законодательство и нормативные акты, касающиеся авиационной безопасности и экологии, влияют на стандарты производства и эксплуатации авиационной техники);
- геополитическая стабильность (конфликты и политическая нестабильность в регионах, где расположены ключевые производители, могут повлиять на поставки и производство);
- государственная поддержка (инвестиции со стороны государства в развитие авиационной отрасли могут способствовать улучшению качества авиационной техники).

2. Экономические факторы, под которыми понимается:

- экономический рост (увеличение экономической активности повышает спрос на авиационные услуги и, соответственно, на авиационную технику);
- финансирование и кредиты (доступность финансирования для закупки новой авиационной техники влияет на обновление и поддержание воздушного флота);
- изменения в валютных курсах (колебания валют могут повлиять на стоимость импортируемых компонентов и материалов).

3. Рыночные факторы, под которыми понимается:

- спрос и предложение (колебания спроса на авиаперевозки влияют на объемы производства и инновации в авиационной отрасли);
- цена на нефть (изменения в стоимости топлива могут повлиять на эксплуатационные расходы и на выбор типа авиационной техники).

4. Технологические факторы, под которыми понимается:

- инновации, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (чтобы оставаться конкурентоспособными, авиационные компании должны инвестировать в научные исследования и разработки новых технологий, что способствует улучшению качества);
- автоматизация и IT-технологии (внедрение новых технологий, таких как системы управления и автоматизации, может повысить надежность и эффективность авиационной техники).

5. Конкурентные факторы, под которыми понимается:

- конкуренция на рынке (наличие сильных игроков на рынке требует от производителей постоянного улучшения качества и снижения издержек);
- сотрудничество и альянсы (стратегические партнерства могут помочь в обмене технологиями и опытом, что также способствует повышению качества).

6. Международные факторы, под которыми понимается:

- глобализация (упрощение обмена технологиями и комплектующими между странами может приводить к повышению качества авиационной техники);

- международные стандарты (следование международным стандартам безопасности и качества способствует унификации и улучшению качества надзорных механизмов).

Все эти факторы взаимосвязаны и могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на качество авиационной техники, в зависимости от конкретных обстоятельств [3].

Для того, чтобы оценить степень влияния факторов на уровень качества, проводится факторный анализ. Под ним понимается постепенный переход от первоначальной взаимосвязанной совокупности факторов к окончательной, анализа полного спектра прямых количественных факторов, влияющих на изменение конечного показателя. В зависимости от типа взаимосвязи между показателями выделяют детерминированный и стохастический анализ.

Детерминированный анализ исследует, каким образом факторы, имеющие функциональную связь с результативным показателем, влияют на его величину. В этом контексте результативный показатель может быть представлен в виде произведения, частного или алгебраической суммы указанных факторов.

Детерминированные модели можно разделить на четыре основных вида:

1. Аддитивные модели, представляющие собой математическую сумму показателей.
2. Мультипликативные модели, представляющие собой произведение показателей.
3. Кратные модели, представляющие собой отношение показателей.
4. Смешанные модели, представляющие собой сочетание перечисленных выше моделей.

Стохастический анализ - это метод исследующий факторы, связь которых с итоговым показателем является неполной и вероятностной [4]. В стохастическом анализе исследование проходит в условиях неопределенности. В отличие от функциональной зависимости, где колебание одной переменной неизменно приводит к определенному изменению результата, в стохастическом анализе одно и то же изменение может породить широкий спектр возможных исходов. Это делает его особенно полезным для понимания сложных систем, где множество переменных взаимодействуют друг с другом, создавая непредсказуемые результаты [5].

В предложенном способе применяются экспертные методы, то есть в основу оценки внешних факторов положена совокупность субъективных мнений экспертов в исследуемой области. Соответственно, итоговое значение влияния внешних факторов на качество авиационной техники будет носить стохастический характер.

Критериями оценки внешних факторов выбираются: уровень влияния, вероятность наступления события, направленность влияния.

Значение уровня влияния внешнего фактора задается экспертом по пятибалльной шкале. Пятибалльная шкала, описывающая уровень влияния внешних факторов на качество авиационной техники, позволяет экспертам оценивать влияние различных условий или изменений на показатели качества авиационной техники [6]. Эту шкалу можно интерпретировать следующим образом:

1 балл (минимальное влияние). Внешний фактор оказывает практически незначительное влияние на качество авиационной техники. Изменение в этом факторе не вызывает заметных изменений в показателе качества.

2 балла (низкое влияние). Внешний фактор имеет незначительное влияние, но его воздействие может регистрироваться в определенных условиях. Тем не менее, это влияние не является критически важным для общей оценки качества.

3 балла (среднее влияние). Внешний фактор оказывает умеренное влияние на качество. Изменения в этом факторе могут привести к важным, но не критическим последствиям, требующим внимания, но не подрывающим основную работу авиационной техники.

4 балла (высокое влияние). Внешний фактор оказывает значительное влияние на качество авиационной техники. Изменения в этом факторе могут существенно повлиять на показатель качества, требуя активных мер по контролю и управлению.

5 баллов (максимальное влияние). Внешний фактор имеет максимальное влияние на показатель качества авиационной техники.

При использовании такой шкалы экспертам следует учитывать специфику рассматриваемых факторов и условия, в которых они действуют, для более точной и объективной оценки их влияния.

Один из известных способов оценки вероятности наступления события - использование пятибалльной шкалы, которая позволяет проще и нагляднее выразить субъективные ожидания. Такая шкала выглядит следующим образом:

1 балл - очень низкая вероятность: событие практически не произойдет (менее 10%).

2 балла - низкая вероятность: событие маловероятно, но возможны исключения (от 10% до 40%).

3 балла - средняя вероятность: событие может произойти, но нет никаких гарантий (от 40% до 60%).

4 балла - высокая вероятность: событие скорее всего произойдет, хотя есть небольшие риски (от 60% до 90%).

5 баллов - очень высокая вероятность: событие практически гарантированно произойдет (более 90%).

Направленность влияния внешних факторов на показатель качества является важной темой в области управления качеством. Внешние факторы могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие, и понимание их природы позволяет компаниям эффективно адаптироваться к обстоятельствам и поддерживать высокий уровень качества.

Положительное влияние (1) - это когда изменения, улучшения или практики приводят к повышению показателя качества.

Отрицательное влияние (-1) - это когда изменения или действия снижают значение показателя качества.

При определении направленности влияния внешнего фактора на показатель качества эксперты должны прийти к единому мнению. Если мнения экспертов разделились, то направленность влияния внешнего фактора выбирается по наибольшему количеству голосов.

Важно проводить регулярный анализ и оценку факторов, влияющих на показатели качества, чтобы своевременно выявлять и устранять негативные влияния, а также усиливать положительные их влияние [7,8].

Для того, чтобы оценивать влияние внешних факторов на показатели качества, необходимо выбрать образец АТ. В качестве образца авиационной техники будем рассматривать среднемагистральный узкофюзеляжный пас-

сажирский самолет МС-21. Он характеризуется множеством показателей, определяющих его качество. Оценка влияния внешних факторов на каждый из показателей является достаточно трудоемкой работой. Поэтому в качестве примера для рассмотрения выберем один из показателей качества АТ – его массу.

Пассажирский самолет МС-21 представляет собой современное воздушное судно, спроектированное с учетом новейших технологий и материалов. На его массу, в первую очередь, влияют его конструктивные особенности, основными из которых можно выделить:

1. Материалы конструкции. Использование композитных материалов, таких как углеродные и стеклопластиковые волокна, позволяет снизить массу самолета, обеспечивая при этом высокую прочность и устойчивость к коррозии.

2. Аэродинамика. Оптимизированная форма крыла и фюзеляжа способствует улучшенному аэродинамическому профилю, что приводит к снижению сопротивления воздуха и, как следствие, уменьшению массы необходимых силовых установок.

3. Силовая установка. Эффективные двигатели ПД-14 разработаны с учетом снижения веса при сохранении высокого уровня мощности, что позволяет уменьшить общую массу самолета.

4. Интеграция систем. Современные технологии интеграции систем управления полетом, навигации и безопасности позволяют сократить вес за счет уменьшения количества необходимых компонентов и упрощения проводки.

5. Конструкция фюзеляжа. Использование модульной конструкции позволяет оптимизировать вес и упростить обслуживание, а также уменьшить количество необходимых соединений и узлов, что также влияет на общую массу.

6. Внутренние системы. Новый подход к проектированию внутренних систем (например, системы кондиционирования, водоснабжения и электроснабжения) позволяет существенно сократить их вес.

Совокупность этих факторов делает МС-21 конкурентоспособным самолетом в своем классе, обеспечивая не только высокую экономическую эффективность, но и улучшенные эксплуатационные характеристики [9].

Исходные данные по выбранным критериям оценки влияния внешних факторов на массу пассажирского самолета МС-21 и рассчитанные значения сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Влияние внешних факторов на массу пассажирского самолета МС-21

Показатель качества, для которого учитывается влияние внешних факторов	Внешние факторы	Уровень влияния (n_i)				Вероятность наступления события (p_i)				Направленность влияния (k_i)	Степень влияния внешнего фактора (F_i)
		Эксперты				Эксперты					
		1	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**		
Масса самолета	1. Политические	3	2	3	2	5	4	4	5	1	0,045
	2. Экономические	3	2	3	3	3	3	4	3	-1	- 0,0358
	3. Рыночные	2	3	3	3	3	3	3	2	-1	- 0,0303
	4. Технологические	3	3	2	3	3	4	3	4	1	0,0385
	5. Конкурентные	2	3	2	2	4	3	4	4	1	0,0338
	6. Международные	2	3	2	3	3	3	4	3	-1	- 0,0325
Итоговое значение (F)	0,0187										

Степень влияния внешнего фактора определяется по формуле 1.

$$F_i = \frac{\sum_{i=1}^{n}(n_i \cdot p_i) \cdot k}{1000 \cdot S}, \quad (1)$$

где: S - количество экспертов, участвующих в опросе; n_i - направленность влияния *i - го* внешнего фактора; p_j - вероятность наступления *i - го* события, k_i – вектор влияния *i - го* фактора.

Итоговое значение влияния внешних факторов (F) рассчитывается по формуле 2.

$$F = F_n + F_э + F_p + F_m + F_к + F_м \ , \quad (2)$$

где: F_n – степень влияния политического фактора; $F_э$ - степень влияния экономического фактора; F_p - степень влияния рыночного фактора; F_m - степень влияния технологического фактора; $F_к$ - степень влияния конкурентного фактора; $F_к$ - степень влияния международного фактора.

Проведя расчеты по приведенным формулам 1 и 2, было получено итоговое значение влияния внешних факторов на массу самолета МС-21 равное 0,0187. Это значение является безразмерной величиной и используется в «Методике оценке уровня качества образцов авиационной техники» [10]. В данной методике для качественных и количественных значений различных свойств образцов авиационной техники, их привели к нормированной в шкале [0;1]. Таким образом, итоговое значение внешнего фактора учитывается в расчете нормированного значения массы образца авиационной техники, которое находится в диапазоне от 0 до 1.

Анализ влияния внешних факторов на качество авиационной техники – это важная составляющая как в процессе разработки и производства, так и в эксплуатации воздушных судов. Данная тематика становится всё более актуальной в условиях стремительного развития технологий и повышения требований к безопасности и качеству авиационного транспорта.

Список литературы

1. Казяева И.А. Факторы, оказывающие влияние на качество продукции // Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации». 2016 [Электронный ресурс]. URL: https://web.snauka.ru/issues/2016/06/68914 (дата обращения: 08.09.2024).

2. Факторы, влияющие на качество продукции в промышленном производстве / Е.А. Шацких // Альманах современной науки и образования. 2014. Вып. 12. С. 140-142.

3. Грищенко О.В. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия: учебное пособие / О.В. Грищенко – Таганрог: Изд-во ТРГУ, 2000. 112 с.

4. Савицкая Г.В. Анализ хозяйственной деятельности: Учебное пособие / Г.В. Савицкая. 2-е изд. испр. и доп. Минск: РИГТО, 2012. 367 с.

5. Факторный анализ, его виды и методы / Ширяева Н.В. // Экономика и социум. 2015.Вып. 1. С. 1310-1313.

6. Метод экспертной оценки влияния факторов на продвижение материального потока / О.М. Сярдина, Е.А. Горина // Экономика и бизнес: теория и практика. 2018. Вып. 1. С. 72-78.

7. Ермолаева Е.О. Контроль качества продукции и услуг: учебное пособие / Е.О. Ермолаева; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. Кемерово, 2009. 160 с.

8. Шевелёва Г.И. Контроль качества продукции: Учебный комплекс. – Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. Кемерово, 2004. 140с.

9. AS9100D:2016 International aerospace quality. Management system standard aviation, space, and defense organizations. An executive overview (with additional content provided for AS9110C and AS9120B), 2017 - Perry Johnson Consulting.

10. Методика оценки уровня качества образцов авиационной техники / Усачев Д.В., Чепко И.Н. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024 г. Вып. 3. С. 471-477.

Усачев Денис Владимирович, слушатель, usachev_denis@mail.ru, Россия, Воронеж, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF EXTERNAL FACTORS ON THE QUALITY OF AIRCRAFT

D.V. Usachev

In this article, based on the analysis of existing approaches to the classification of factors affecting the quality of aircraft samples, all factors are divided into three groups: internal, external, and human. The main focus of the work is on the consideration of external factors. Among the external factors, the following are highlighted: political, economic, market, technological, competitive, inter national. The criteria for evaluating external factors are the level of influence, the probability of occurrence of an event, and the direction of influence, which are summarized in an even table. As an example, one of the quality indicators of the MS-21 medium-haul passenger aircraft is its mass. Based on the calculations performed by expert methods, conclusions were drawn about the influence of external factors on the mass of MS-21.

Key words: influence of external factors, evaluation criteria, expert method, quality indicator, aircraft weight.

Usachev Denis Vladimirovich, postgraduate, usachev_denis@mail.ru, Russia, Voronezh, Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin

УДК 621.9.08
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-192-193

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН

С.М. Никольский

В настоящей статье рассмотрены основные методы контроля геометрических параметров зубчатых колес с использованием координатно-измерительных машин. Определены их достоинства и недостатки. Представлена разработка в виде программно-вычислительного комплекса, направленного на обработку измерительной информации, представленной в виде действительных координат точек профиля зубчатого колеса, преобразование ее в отклонения контролируемых параметров и определение соответствия результатов измерений требованиям научно-технической документации.

Ключевые слова: КИМ, измерения, зубчатое колесо, методы контроля, параметры, программное обеспечение.

В настоящее время все КИМ можно разделить на две основных категории — универсальные и узкоспециализированные машины. На одних контролю подлежат исключительно зубчатые колеса, на других номенклатура измеряемых изделий ограничивается лишь габаритными размерами машины. Однако ввиду распространенности и широты применения на различных предприятиях, речь в данной работе идет исключительно об универсальных КИМ. Проведение контроля линейно-угловых параметров зубчатых колес на данных машинах невозможно представить без совместного использования вместе с нормативными документами, так или иначе регламентирующих интерпретацию результатов работы данного оборудования. В настоящее время в отношении зубчатых колес появляется не так уж и много государственных стандартов, одним из последних стал ГОСТ ISO 1325-1-2017, который действует вместе с рядом отечественных ГОСТов, принятых в еще в прошлом веке.

Проведение анализа соответствия терминологии ГОСТа ISO 1325-1-2017 и ГОСТа 1643-81 хоть и показывает некоторые различия, представленные в первой главе, однако позволяет их совместное использование, что в свою очередь допускает использование КИМ и поставляемого с ними программного обеспечения (ПО).

Существует несколько подходов (методов) проведения контроля зубчатых колес с применением КИМ. Среди них выделяют:

1.Проведение прямых измерений при помощи стандартного ПО КИМ (без дополнительных опций).

Преимуществами данного метода являются — универсальность, т.е. возможность измерения зубчатых колес любого типа, ограничиваясь только возможностями оборудования, отсутствие необходимости в приобретении дополнительного ПО, возможность измерить любой параметр. Недостатками метода являются — проведение всех операций вручную, трудоемкость, влияние оператора, сравнительно большое время измерения и самое важное — отсутствие методики обработки результатов измерений.

2.Измерение по 3–D (CAD) модели. Данный метод подразумевает проведение прямых сравнений измеренного контура (облака точек) с CAD моделью (рис.1)

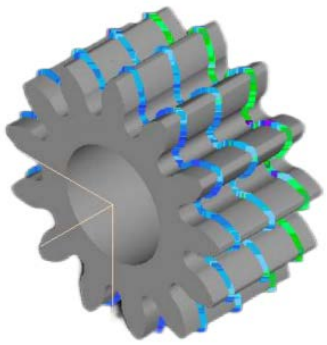


Рис. 1. Сравнение измеренного облака точек с 3–D моделью зубчатого колеса

Преимуществом данного метода является то, что измерение боковой поверхности колеса происходит по номиналу модели и исключает возможность зондирования на неэвольвентном участке профиля, иными словами оператор может контролировать процесс обхода точек контакта в более удобном их графическом представлении. Так же при визуальном контроле, применяемом в этом случае, при совмещении модели и измеренного контура (облака точек), не требуется от оператора специальных знаний. Недостатками метода являются —необходимость разработки 3D-модели для каждого типа изделий, а также проведение части операций вручную, таких как измерение базовых поверхностей и выполнение операций выравнивания, т.е. процедуры совмещения системы координат КИМ и модели. Необходимость контроля баз сама по себе вносит определенную погрешность, т.к. они изготовлены со своими допусками, которые могут как улучшить, так и ухудшить общую картину.

3.Измерение при помощи специализированного программного модуля.

Данное ПО позволяет полностью автоматизировать процесс контроля, обеспечивает высокую производительность, однако в настоящее время не существует универсального ПО, позволяющего контролировать любые параметры любого зубчатого колеса. Данные ПО имеют узкую специализацию и разрабатываются производителем для каждого конкретного вида оборудования, (будь то КИМ портального типа или узкоспециализированные измерительные системы), типа зубчатого колеса, используя в качестве основы такие зарубежные стандарты как DIN 5481, DIN 5482, DIN 3965, AGMA 2000-A88, JISB1702.Таким образом на данный момент, актуальной задачей являлось бы создание универсального программного модуля, позволяющего проводить автоматизированный контроль требуемых параметров на неспециализированных, т.е. универсальных КИМ и выполнять обработку результатов измерений на основе отечественных стандартах ГОСТ [1].

Учитывая вышеизложенные обстоятельства, было принято решение разработать собственное программное обеспечение, отвечающего за формирование и обработку измерительной информации в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. Подобное решение является серьезным подспорьем для тех владельцев КИМ, доступ которых к узкоспециализированным модулям и пакетам ограничен, ввиду их недоступности или крайне высокой стоимости. Данная разработка представляет собой программно-вычислительный комплекс контроля геометрических параметров цилиндрических прямозубых зубчатых колес, созданный на основе достижений современного уровня техники, известных математических формулах и зависимостях, представленных в государственных стандартах (ГОСТ), затрагивающих зубчатые передачи и зацепления. Программно-вычислительный комплекс позволяет выполнять оценку геометрических параметров зубчатых колес в соответствии с разработанной методикой проведения измерений.

Главным назначением программы является расчет массивов данных, включающих в себя номинальные координаты точек профиля зубчатого колеса для их дальнейшего импорта в программное обеспечение (ПО) КИМ, освобождение оператора от необходимости измерения детали в ручном режиме, а также обработка измерительной информации, представленной в виде действительных координат точек профиля зубчатого колеса, преобразование ее в отклонения контролируемых параметров и определение соответствия результатов измерений требованиям научно-технической документации (НТД).

Архитектуру программного комплекса номинально можно разделить на два самостоятельных блока: блок формирования массива координат контрольных точек профиля зубчатого колеса и блок обработки измерительной информации, представленной в виде действительных координат точек профиля зубчатого колеса (рис.2)

Блок №1 предназначен для формирования массива координат точек контакта боковой поверхности зубчатых колес и их последующего импорта в базовое программное обеспечение КИМ. Для формирования такого массива, согласно данным чертежа зубчатого колеса в окно ввода информации заносятся такие данные как:m— модуль, z — число зубьев колеса, r_a — диаметр вершин; допуск на диаметр вершин, b — ширина зубчатого венца, x — коэффициент коррекции, E_{HS} — наименьшее дополнительное смещение исходного контура, T_H — допуск на наименьшее дополнительное смещение исходного контура. Помимо вышеперечисленных данных, также указываются такие параметры как: h_a — коэффициент головки зуба, h_f — коэффициент зуба, a_n — угол зацепления (20 градусов) [2]. После

того, как все необходимые для работы данные были внесены в соответствующие окна, программное обеспечение на их основе определяет зону контроля боковой поверхности колеса. Ее положение и размеры определяется рядом математических действий. Так, нижняя граница зоны контроля проходит по радиусу начальной окружности, иначе говоря, по началу формирования эвольвентного профиля (r_{Ff}), в свою очередь верхняя граница проходит по радиусу окружности верхних точек активных профилей зубчатого колеса (r_a). Однако, в силу конструктивных особенностей зубчатых колес, при такой условно большой зоне контроля, велик риск попасть измерительным наконечником КИМ на неэвольвентные участки профиля и на области притупления вершин. Ввиду данного обстоятельства, в рассматриваемом программном обеспечении выполняется уменьшение зоны контроля с двух сторон (рис.4). Так, радиус нижней границы увеличивается на величину σh = 0,2 … 0,5 мм, верхняя же граница уменьшается на ту же величину $\sigma h(r_{Na})$ и на величину допуска радиуса вершин (r_{Fa}). Дальнейшее формирование зоны контроля предполагает выбор количества контролируемых уровней (сечений), количества контролируемых точек на каждом из уровней, а также число и расположение впадин, подлежащих измерениям.



Рис. 2. Архитектура программы

Итогом формирования зоны контроля боковой поверхности зубчатых колес является графическое представление расположения точек зондирования на профиле в соответствии с заданными параметрами. По окончании всех манипуляций автоматически формируется массив данных в виде текстового файла для удобного импорта в программное обеспечение КИМ и дальнейшей работы с ним. Полученные выходные данные отображаются в специальном блоке ПО и содержат в себе XYZ-координаты точек боковой поверхности зубчатого колеса, а также векторы нормали IJK импортируемые в ПО КИМ.

В дальнейшем по полученным данным выполняются измерения боковых поверхностей зубчатого колеса. Результаты измерений импортируются во второй блок программы, где выполняется их обработка.

Представленный порядок подготовки исходных данных, проведения измерений на КИМ и обработки результатов измерений позволяет получить расчетные параметры зубьев конкретного колеса, близкие к результатам измерений, полученных при использовании комплекса специального измерительного оборудования.

Список литературы

1. Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М. Анализ методик контроля зубчатых колес на координатно-измерительных машинах // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении. III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Тула, 2022. С. 148-151.

2. Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М. Рекомендации по разработке методики контроля зубчатых колес на КИМ // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25. № 9 (291). С. 46-51.

Никольский Сергей Михайлович, начальник лаборатории координатно-измерительных машин, nikolsky.serge@yandex.ru, Россия, Тула, АО «АК «Туламашзавод»

METHODS OF CONTROL OF GEAR PARAMETERS USING COORDINATE MEASURING MACHINES

S.M. Nikolsky

This article considers the main methods of control of geometric parameters of gear wheels using coordinate measuring machines. Their advantages and disadvantages are defined. The development in the form of a computer-software complex is presented, aimed at processing the measurement information presented in the form of actual coordinates of the points of the gear wheel profile, transforming it into deviations of the controlled parameters and determining the compliance of the measurement results with the requirements of scientific and technical documentation.

Key words: CMM, measurements, gear wheel, control methods, parameters, software.

Nikolsky Sergey Mikhailovich, head of the coordinate measuring machine laboratory, nikolsky.serge@yandex.ru,Russia, Tula, JSC «Tulamashzavod»

УДК 620.192.34
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-195-196

СПОСОБ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В ЛИТЫХ ЗАГОТОВКАХ

А.Г. Ивахненко, М.С. Разумов, П.Н. Савин, П.В. Глазков, О.Н. Мальцев

Литьё один из самых распространенных методов получения деталей и заготовок. Своё распространение данный метод получил из-за того, что этим методом можно получать заготовки сложной формы, большой массы при этом расходуя минимальное количество сырья. Однако в литейном производстве существует вероятность образования дефектов в отливках. Дефекты можно разделить на две большие подгруппы: явные и скрытые дефекты литья. В связи, с чем предлагается новый экспресс-метод определения скрытых дефектов, который лишен некоторых недостатков и имеет ряд преимуществ. Данный способ направлен на определение внутренних дефектов, при которых дальнейшее использование заготовки становится невозможным и признается браком.

Ключевые слова: литьё, скрытый дефект, заготовка, гидростатическое взвешивание.

Литьё один из самых распространенных методов получения деталей и заготовок. Своё распространение данный метод получил из-за того, что этим методом можно получать заготовки сложной формы, большой массы при этом расходуя минимальное количество сырья [1-3]. Однако в литейном производстве существует вероятность образования дефектов в отливках [4-6]. Дефекты можно разделить на две большие подгруппы: явные и скрытые дефекты литья. Явный дефект выявляется при визуальном контроле или предписанными в нормативной документации инструментальными средствами и методиками дефектоскопии [7, 8]. Скрытый дефект – это дефект, не обнаруживаемый при внешнем осмотре и не выявляемый предусмотренной для контроля аппаратурой. Наиболее нежелательно и опасно, когда скрытый дефект проявляется в процессе эксплуатации изделия, что может вызвать аварийную ситуацию. Регистрация скрытых дефектов является сложным и трудозатратным процессом. Таким образом, разработка методов выявления дефектов является актуальной задачей отечественного машиностроения.

В этой связи предлагается новый экспресс-метод определения скрытых дефектов, который лишен некоторых недостатков и имеет ряд преимуществ [9, 10]. Данный способ направлен на определение внутренних дефектов, при которых дальнейшее использование заготовки становится невозможно, и она признается браком. Основным достоинством данного метода является малое время определения дефектности заготовки, тем самым можно проверить их большее количество. При этом возможно снижение количество отбракованных деталей, полученных методом литья на дальнейших этапах обработки заготовки, тем самым повышается эффективность производства.

Представленный метод основан на гидростатическом взвешивании, путем использования измерения плотности материала для определения дефектов в отливке. Метод позволяет обнаруживать внутренние дефекты, такие как поры или включения, поскольку они изменяют объём и плотность отливки по сравнению с эталонными значениями, при последующем определении степени дефектов детали по разнице значений плотности.

Для определения геометрии и координат дефекта эталонную деталь разбивают на пропорционально одинаковые по весу части в трех направлениях и определяют их толщину, т. е. размер на который надо поместить в воду и сравнивают эталонную плотность с полученной путем гидростатического взвешивания. Если дефекта нет, то плотности равны, если плотность уменьшилась, то регистрируют геометрию и координату дефекта. Если плотности на следующем участке совпадают значит дефект закончился.

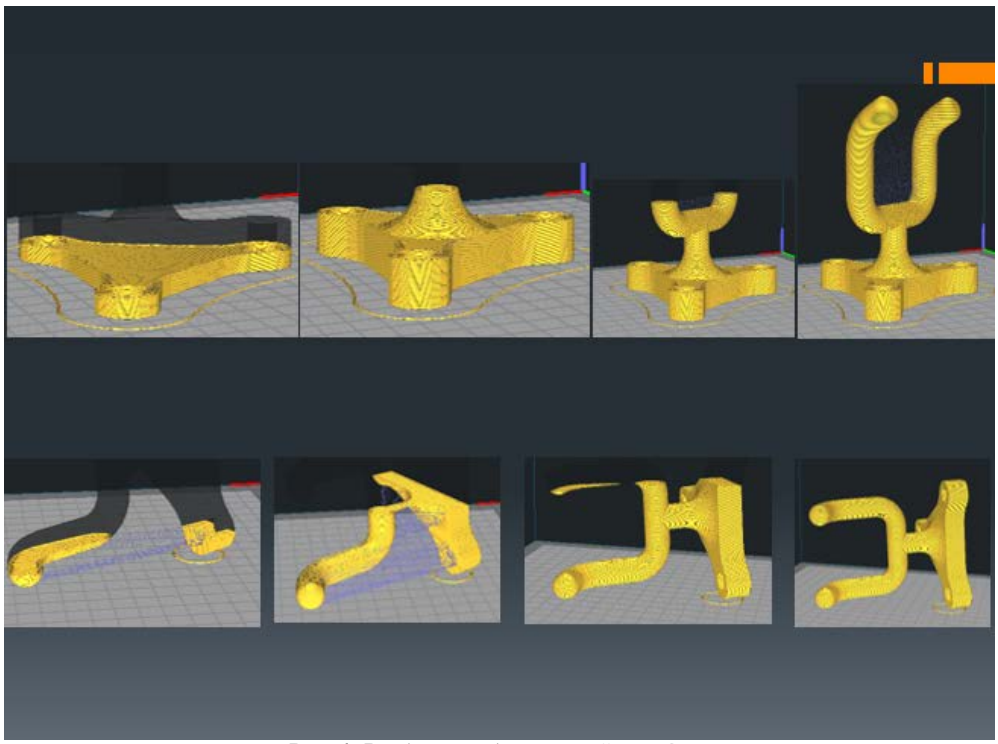
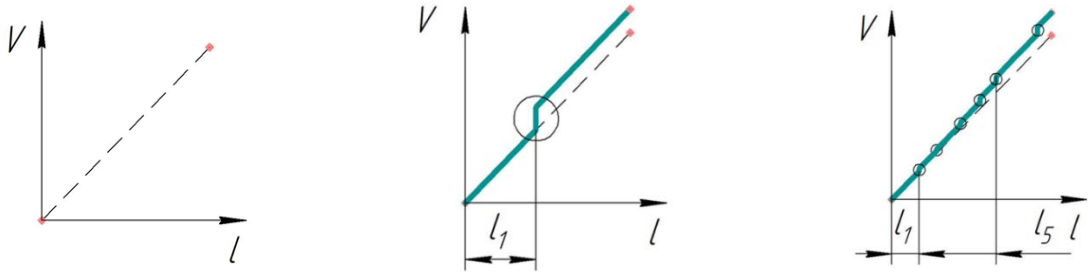


Рис. 1. Разбивка модели в слайсере Cura

При отсутствии дефекта наблюдается ровная линия; при единичном дефекте прослеживается площадка на графике, где плотность уменьшилась на определенном участке, а в дальнейшем эталонная и полученная плотности совпадают, то регистрируемый дефект является локальным; если полученная плотность продолжает отличаться от эталонной, то регистрируемый дефект является распространённым. При регистрации величины погружения в различных плоскостях можно, определить геометрию и координаты дефекта.



а *б* *в*

Рис. 2. Графики деталей: а – график детали без дефектов, б – график детали с одним крупным дефектом, в – график детали с множеством мелких дефектов

Основным вопросом при реализации данного метода является точность измерения, связанная с определением условий измерения и точности оборудования, при которых данный способ будет давать адекватную оценку дефектности детали.

Для повышения точности метода гидростатического взвешивания и улучшения выявления скрытых дефектов в литых изделиях, предлагается использовать два тензодатчика повышенной точности, один сверху и один снизу заготовки, и использовать постепенное погружение заготовки в жидкость. Это позволит детально анализировать распределение плотности в различных частях образца, выявляя малые изменения плотности и локальные дефекты. Рассмотрим подробнее, как это реализовать и как будет происходить процесс измерения.

К верхнему тензорезистору прикрепляется нить, удерживающая заготовку. Этот датчик измеряет силу натяжения, действующую на заготовку сверху, когда она погружается в жидкость. В свою очередь, нижний тензодатчик измеряет вес заготовки через платформу или другую поддержку.

Заготовка погружается в жидкость постепенно, что позволяет измерять вес каждой части заготовки по отдельности. Это поможет выявить изменения плотности на различных участках. Полученные данные от двух тензодатчиков обрабатываются для расчета локальной плотности. Разделение заготовки на участки позволяет детализировать информацию о распределении плотности и выявлять в том числе самые незначительные дефекты.

Для локализации дефектов нужно измерять значения массы заготовки при погружении с разных сторон и сравнивать измеренные значения для обнаружения аномалий. Небольшие дефекты будут влиять на значение массы по-разному, в зависимости от стороны погружения, что позволит определить их расположение.

Предлагается следующая методика измерений.

1. Подготовка к измерению.

Закрепим два тензодатчика (верхний и нижний) на фиксированной платформе.

Верхний датчик соединяется с заготовкой с помощью нитки (плотность и масса не учитывается в расчетах), нижний датчик поддерживает заготовку.

Убедившись, что система настроена на измерение массы заготовки в жидкости, переходим к следующему этапу.

2. Постепенное погружение.

Погружаем заготовку в жидкость (например, воду) постепенно с разных сторон (например, сверху, снизу, слева, справа, спереди, сзади).

На каждом шаге фиксируем измеренную массу заготовки с помощью обоих тензодатчиков.

3. Сбор данных.

Запишем данные массы для каждого положения погружения. Полученные данные отражают плотность заготовки в разных местах. Анализируем данные и построенные карты дефектов. Сравним измеренные значения массы для каждого положения погружения. Определяем участки с наибольшими отклонениями от средней массы. Построим карту дефектов на основе различий в измеренных массах.

В данной конфигурации каждый тензодатчик измеряет свою часть нагрузки, и их разница дает эффективную массу заготовки:

$$m = \frac{\left(F_{\text{низ}} - F_{\text{верх}}\right)}{g},$$

или

$$m = m_{\text{низ}} - m_{\text{верх}},$$

где $F_{\text{верх}}$ – величина силы, измеренная верхним тензодатчиком, $F_{\text{низ}}$ – величина силы, измеренная нижним тензодатчиком, m – масса заготовки, g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²).

Рассчитаем локальную плотность каждой части заготовки, используя формулу:

$$\rho_i = \frac{W_{i.воздух} - W_{i.жидкость}}{V_i},$$

где ρ_i – плотность участка, $W_{i.воздух}$ – вес участка в воздухе, $W_{i.жидкость}$ – вес участка в жидкости, $W_{i.воздух}$ – объем участка.

4. Сравнение рассчитанной плотности с ожидаемой плотностью материала для выявления отклонений.

Приведем пример расчета по данной методике.

Для заготовки из алюминия массой 400 грамм, разделенной на 4 части по 100 граммов:

В воздухе:

$$F_{\text{верх}} = 0 \text{ г},$$

$$F_{\text{ниж}} = 400 \text{ г}.$$

В жидкости (частично погружена):

$$F_{\text{верх}} = 100 \text{ г},$$

$$F_{\text{ниж}} = 300 \text{ г}.$$

Сила выталкивания:

$$F_{\text{выталкивания}} = 400 - (100 + 300) = 0.$$

Объём каждого участка:

$$V_i = \frac{100 \text{ г}}{2{,}7 \text{ г/см}^3} \approx 37 \text{ см}^3.$$

Если сила выталкивания значительно меньше, чем рассчитанная, это может указывать на дефект.

Проведем расчеты для заготовки массой 50 грамм используя для взвешивания тензодатчики С2 класса точности, комбинированная погрешность одного датчика составляет 0,02 %. Для двух датчиков в конфигурации с взаимовычитанием погрешность комбинированной системы:

$$\delta_{\text{комб}} = \sqrt{\delta_{\text{верх}}^2 + \delta_{\text{низ}}^2}.$$

Подставим значения:

$$\delta_{\text{комб}} = \sqrt{(0{,}02\ \%)^2 + (0{,}02\ \%)^2} \approx 0{,}0283\ \%.$$

Для заготовки массой 50 грамм, минимальная часть, которую можно измерить, определяется как:

$$m_{\min} = \delta_{\text{комб}} \cdot m_{\text{заготовка}}.$$

Подставим значения:

$$m_{\min} = 0{,}0283\ \% \cdot 50 \text{ г} = 0{,}01415 \text{ г}.$$

Таким образом, минимальная часть заготовки (50 г,), которую можно надежно измерить, составляет примерно 0,01415 г (14,15 мг).

Минимальный объём дефекта, определяется как:

$$V_{\text{дефекта}} = \frac{m_{\min}}{\rho} \cdot \frac{0{,}01415 \text{ г}}{4{,}506 \text{ г/см}^3} \approx 0{,}00314 \text{ см}^3 = 3{,}14 \text{ мм}^3.$$

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета

Параметр	Значение
Масса заготовки	50 г
Погрешность одного датчика	0,02 %
Комбинированная погрешность	0,0283 %
Минимальная часть для 50 г	0,001415 г (14,15 мг)
Минимально измеряемый дефект	3,14 мм^3

Разбивая детали и взвешивание с разных сторон позволяет создать детализированную карту плотности, выявляя скрытые дефекты. Эта техника включает в себя последовательное измерение массы отдельных сегментов детали, что позволяет более точно определить распределение плотности и локализовать дефекты. Каждое измерение добавляет информацию о плотности материала, улучшая общую точность обнаружения дефектов. Разбиение позволяет изолировать участки с аномальными значениями плотности, указывая на наличие дефектов в конкретных областях изделия. Объединение данных из множества измерений помогает построить карту плотности, детализированную по объему изделия. При измерении с трех сторон каждая сторона дает свою оценку плотности, и объединение этих данных увеличивает общую точность определения дефектов.

Аналогично производится измерение плотности с 3-х сторон.

1. Измеряем изменение плотности на горизонтальных плоскостях.
2. Определяем плотность по вертикальным плоскостям.
3. Измеряем плотность в поперечном сечении.

Каждое измерение с разных сторон помогает исключить локальные ошибки и уточнить данные, улучшая точность обнаружения дефектов.

Для более подробного объяснения данного метода приведем пример расчета.

Рассчитаем массу алюминиевого куба с объемом 1000 см^3 и размером 100 мм × 100 мм × 100 мм, масса алюминиевого куба 2700 г.

Минимальная масса, которую можно измерить, определяется как:

$$m_{\min} = 0{,}0283\ \% \cdot 2700 \text{ г} = 0{,}764 \text{ г}.$$

Минимальный объём:

$$V_{\min} = \frac{0{,}764 \text{ г}}{2{,}7 \text{ г/мм}^3} = 0{,}283 \text{ мм}^3.$$

Это означает, что изменения массы могут быть измерены с точностью до:

$$m_\delta = 0{,}764 \text{ г} \cdot 0{,}0283 = 0{,}022 \text{ г}.$$

Эквивалент в объёме:

$$V_\delta = \frac{0{,}022 \text{ г}}{2{,}7 \text{ г/мм}^3} = 0{,}00814 \text{ мм}^3$$

Рассчитаем максимальное количество измеряемых слоев:

$$n_{\max} = \frac{2700}{0{,}764} = 3534{,}031 \to 3534$$

На рис. 3 представлена визуализация разбиения рассматриваемого куба в 3-х плоскостях.

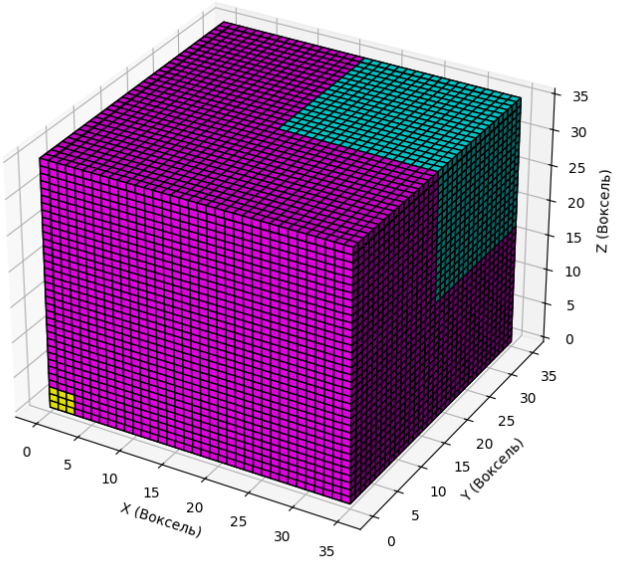


Рис. 3. Куб, разбитый на 35 слоев в каждом направлении

На изображении представлен куб, разделённый на множество более мелких объемных элементов, которые можно назвать «вокселями».

Воксели – это трёхмерные аналоги пикселей, представляющие собой единицы объема. В данном контексте воксели используются для визуализации и анализа плотности материала внутри куба, а также для выявления дефектов.

Рассчитаем количество вокселей для куба, представленного на рис. 3:

$$n = 35 \cdot 35 \cdot 35 = 42875.$$

Рассчитаем объём и массу 1 вокселя для данного куба (рис. 3):

$$V_{\text{вокселя}} = \frac{1000 \text{ см}^3}{42875} = 0{,}0233 \text{ см}^3,$$

$$m_{\text{вокселя}} = \frac{2700 \text{ г}}{42875} = 0{,}063 \text{ г}.$$

Фиолетовый цвет на рис. 3 указывает на области с нормальной плотностью. Желтый цвет показывает области с легкими отклонениями, где могут быть небольшие дефекты. Бирюзовый цвет указывает на значительные отклонения, показывая расположение серьезных дефектов.

Рассчитаем количество вокселей для куба 15x15x15:

$$n = 15 \cdot 15 \cdot 15 = 3375.$$

Рассчитаем объём и массу 1 вокселя

$$V_{\text{вокселя}} = \frac{1000 \text{ см}^3}{3375} = 0{,}296 \text{ см}^3,$$

$$m_{\text{вокселя}} = \frac{2700 \text{ г}}{3375} = 0{,}8 \text{ г}.$$

На рис. 4 мы наблюдаем уменьшение точности расположения мелких дефектов и отсутствие изменения точности для критических дефектов.

Рассчитаем количество вокселей для куба, представленного на рис. 4:

$$n = 5 \cdot 5 \cdot 5 = 125.$$

Рассчитаем объём и массу 1 вокселя для данного куба (рис. 4):

$$V_{\text{вокселя}} = \frac{1000 \text{ см}^3}{125} = 8 \text{ см}^3, \; m_{\text{вокселя}} = \frac{2700 \text{ г}}{125} = 21{,}6 \text{ г}.$$

Данное изображение показывает, что при низком разрешении мелкие аномалии в плотности могут не отображаться в карте дефектов, но серьезные изменения по-прежнему хорошо индицируются.

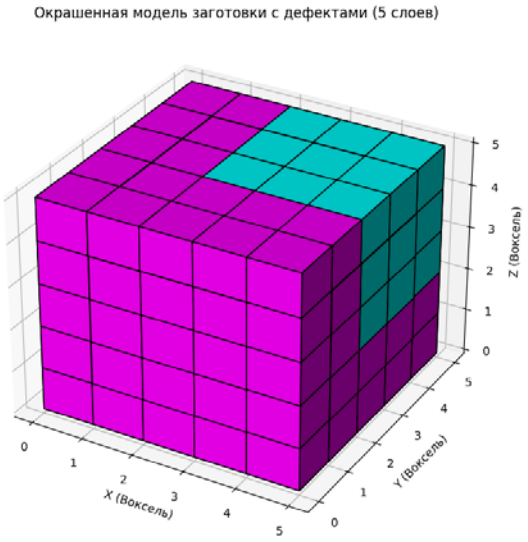


Рис. 4. Куб, разбитый на 5 слоев в каждом направлении

Этот эксперимент служит наглядным примером вариативности данного метода как для простых измерений, так и для точных.

Точность данного метода зависит от плотности измеряемого материала. Чем плотнее материал, тем больше изменения массы для одинакового объема дефекта. Это улучшает точность выявления дефектов, так как погрешность измерений относительна и лучше проявляется в более плотных материалах.

Приведем теоретическое обоснование данной методики.

Плотность влияет на обнаружение дефектов следующим образом: масса заготовки зависит от плотности:

$$m = \rho \cdot V .$$

Таблица 2

Минимальный объём дефекта для приведенных материалов

Плотность (ρ)	Минимальный объём дефекта ($V_{\text{дефекта}}$)
1,0 г/см^3 – пластик	0,01415 см^3
2,7 г/см^3 – алюминий	0,00524 см^3
4,5 г/см^3 – титан	0,00314 см^3
7,8 г/см^3 – сталь	0,00181 см^3
19,3 г/см^3 – золото	0,000733 см^3

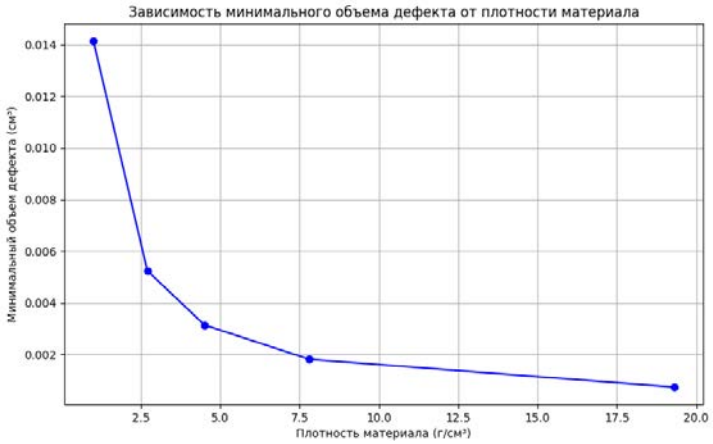


Рис. 5. График зависимости минимального объёма дефекта от плотности материала

Объём дефекта при заданной массе будет меньше в более плотном материале, потому что малый объём дефекта вызывает пропорционально большее изменение массы.

Рассчитаем максимальное разрешение для заготовки из титана: $\rho_{Ti} = 4{,}506$ г / см^3.

весом 2700 г:

$$V_{Ti} = \frac{2700 \text{ г}}{4{,}506 \text{ г/см}^3} = 599{,}2 \text{ см}^3 , \; V_{\min} = \frac{76{,}41 \text{ г}}{4{,}506 \text{ г/мм}^3} = 16{,}96 \text{ мм}^3 .$$

Если сравнивать минимальный определяемый объём для измерения в 1 плоскости с значением для алюминиевого сплава

$$V_{AL} = 28{,}3 > V_{Ti} = 16{,}96 .$$

В табл. 2 представлен расчет минимального объёма дефекта для отливок массой 50 г из таких материалов как: пластик, алюминий, титан, сталь, золото, а на рис. 5 – графическое представление зависимости минимального объёма дефекта от плотности материала, построенной по данным табл. 2.

Чем плотнее материал, тем меньший объем дефекта требуется для изменения массы, достаточного для обнаружения. Это связано с тем, что для плотных материалов даже небольшие дефекты влияют на измеряемую массу сильнее, чем в менее плотных материалах. Это увеличивает точность и минимально обнаруживаемый объем дефектов в плотных материалах, таких как титан, по сравнению с менее плотными, такими как алюминий или пластик.

Используя современные программы для 3D моделирования можно импортировать карты дефектов на модель, так же благодаря встроенным алгоритмам можно рассчитать критичность конкретного дефекта на изделие и его эксплуатационные свойства, тем самым можно уменьшить затраты предприятия.

Таким образом, использование метода гидростатического взвешивания в сочетании с двумя тензодатчиками позволяет эффективно выявлять мелкие дефекты в материалах высокой плотности, таких как титан, сталь, алюминий. Так, например, для титанового изделия массой 50 г минимально обнаруживаемый дефект составляет примерно 0,00314 см³, что обеспечивает высокую точность контроля качества.

Список литературы

1. Шилякин И.В. Литье: Виды литья, их преимущества и недостатки // European Research. 2023. № 1 (40). С. 4-7.

2. Назаратин В.В. Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения. М.: Машиностроение, 2006. 234 с.

3. Simulation of the thermal regime of semi-continuous casting of aluminum alloy ingots / A.I. Bezrukikh, A.A. Iliin, V.A. Matyushentsev [et al.] // Metallurgist. 2023. Т. 66. № 9-10. С. 1299-1307.

4. Чечуха В.И., Садоха М.А. Дефекты в отливках при литье под высоким давлением и меры по предотвращению их образования // Литье и металлургия. 2024. № 1. С. 26-31.

5. Чечуха В.И., Садоха М.А. Дефекты при литье под высоким давлением и меры предупреждения газовых дефектов // Литье и металлургия. 2023. № 4. С. 16-24.

6. Шопина Е.В., Колтыков Я.С. Дефекты литья и методы их исправления // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. науч. статей. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. С. 409-412.

7. Бычков В.И., Галиакбаров Р.В., Гавариев Р.В. Систематизация дефектов отливок, изготовленных методом литья под давлением // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: Сб. науч. тр. XI междунар. науч.-практ. конф. Курск: Изд-во ЗАО Университетская книга, 2014. С. 307-310.

8. Фомихина И.В. Дефекты литья, обработки металлов давлением, термической обработки и пути их устранения на стадии производства // Annali d'Italia. 2023. № 49. С. 112-128.

9. Разумов М.С., Глазков П.В., Кочергин В.С., Бышкин А.С. Определение погрешности выявления скрытых дефектов методом гидростатического взвешивания в деталях, полученных методом литья // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18. № 8. С. 339-342.

10. Метод обнаружения скрытых дефектов в деталях, полученных методом литья / М.С. Разумов, П.В. Глазков, Н.Д. Вязников [и др.] // Современные материалы, техника и технология: Сб. науч. статей 9-й междунар. науч.-практ. конф. Курск: Изд-во ЗАО Университетская книга, 2019. С. 185-188.

Ивахненко Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, ivakhnenko2002@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Разумов Михаил Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, mika_1984_@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Савин Павел Николаевич, студент, 17.115@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Глазков Павел Витальевич, магистр, pavel.glazkovv@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Мальцев Олег Николаевич, студент, oleglaguxa@gmail.com, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет

METHOD FOR DETECTING HIDDEN DEFECTS IN BLANKS OBTAINED BY CASTING

A.G. Ivakhnenko, M.S. Razumov, P.N. Savin, P.V. Glazkov, O.N. Maltsev

Casting is one of the most common methods of obtaining parts and blanks. This method has become widespread due to the fact that this method can produce blanks of complex shape, large mass, while consuming a minimum amount of raw materials. However, in the foundry industry, there is a possibility of defects in castings. Defects can be divided into two large subgroups: obvious and hidden casting defects. In this regard, a new express method for determining hidden defects is proposed, which is devoid of some disadvantages and has a number of advantages. This method is aimed at determining internal defects, in which further use of the blank becomes impossible and is recognized as defective.

Key words: casting, hidden defect, blank, hydrostatic weighing.

Ivakhnenko Alexander Gennadievich, doctor of technical sciences, professor, ivakhnenko2002@mail.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Razumov Mikhail Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, mika_1984_@mail.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Savin Pavel Nikolaevich, student, 17.115@mail.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Glazkov Pavel Vitalievich, master, pavel.glazkovv@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Maltsev Oleg Nikolaevich, student, oleglaguxa@gmail.com, Russia, Kursk, Southwest State University

УДК 621.81:539.4
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-201-202

АНАЛИЗ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КАК КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ

И.Е. Ильин, А.С. Путенихина, Ю.А. Извеков, В.В. Шеметова

В условиях повышения требований к безопасности, исследование техногенной безопасности в металлургии становится важным. Увеличение объемов производства, внедрение новых технологий и рост конкуренции требуют постоянного контроля и оценки рисков. Статья продолжает исследования авторов. Проведен анализ аварий и чрезвычайных происшествий, произошедших на предприятиях, подконтрольных территориальным органам Федеральной службы России по экологическому, технологическому и атомному надзору в период с 2017 по 2022 годы с целью обозначения техногенной безопасности металлургической отрасли России как его комплексного показателя качества. В статье приведены количественные данные причиненного ущерба за эти годы.

Ключевые слова: металлургическое предприятие, металлургия, техногенная безопасность, производственные процессы, контроль и оценка рисков.

В законе Российской Федерации «О безопасности» [1] безопасность определяется как состояние защищенности личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз, которое включает соблюдение и защиту прав и свобод человека и гражданина, законность, системность и комплексность применения политических, организационных, социально-экономических, информационных и правовых мер, приоритет предупредительных мер, а также взаимодействие федеральных, региональных и местных органов власти с общественными объединениями, международными организациями и гражданами.

Так как безопасность является для человека одной из важнейших потребностей, необходимо проводить комплекс мер по обеспечению безопасности как человека и окружающей среды, так и финансовой составляющей предприятий Российской Федерации. Кроме этого, техногенная безопасность будет рассматриваться как комплексный показатель качества металлургической отрасли. Обеспечить безопасность можно двумя путями: исключением источников опасности, предотвращением возможности стихийных бедствий, аварий, потрясений и катаклизмов, а также увеличением степени безопасности, способности надежно противостоять рискам.

Целью данной статьи являются выявление и снижение потенциальных угроз техногенной безопасности в металлургической отрасли, что способствует улучшению условий труда, уменьшению вероятности аварий и минимизации негативного влияния на окружающую среду, а также в снижении финансового ущерба, связанного с техногенными инцидентами.

Техногенная безопасность представляет собой состояние защищенности жизнедеятельности человека и окружающей среды от негативных последствий, возникающих в результате технологической деятельности человека. В металлургической отрасли, где процессы переработки металлов и сплавов сопряжены с высоким уровнем энергозатрат, химических реакций и механических воздействий, техногенная безопасность становится особенно актуальной. Она включает в себя не только предотвращение аварий и инцидентов, но и минимизацию их последствий, а также обеспечение безопасных условий труда для работников.

Техногенная безопасность охватывает широкий спектр аспектов, включая:

1) проектирование и эксплуатацию объектов: правильное проектирование и использование современных технологий способствуют снижению рисков;

2) обучение персонала: квалифицированные работники способны лучше реагировать на потенциальные угрозы;

3) мониторинг и контроль: регулярные проверки и мониторинг состояния оборудования и процессов позволяют выявлять и устранять потенциальные угрозы.

В металлургической отрасли существует множество факторов, влияющих на уровень техногенной безопасности. К ним относятся:

- технические факторы: состояние оборудования – износ, усталость материалов и неправильная эксплуатация могут привести к авариям, катастрофам;
- технологические процессы: сложность и многоступенчатость процессов увеличивают вероятность ошибок и несчастных случаев;
- автоматизация и системы управления: современные системы автоматического контроля могут значительно снизить риски, но их сбои могут иметь серьезные последствия;
- экологические факторы: воздействие на окружающую среду – выбросы и отходы металлургического производства могут оказывать негативное влияние на экосистему;

- природные факторы: наличие природных катастроф (землетрясения, наводнения и т. д.) может повлиять на безопасность производственных объектов.

В настоящее время государственная политика в сфере обеспечения природной и техногенной безопасности реализуется по следующим направлениям: идентификация угроз, анализ рисков и прогнозирование чрезвычайных ситуаций, снижение уровня риска и повышение эффективности защиты населения и территорий, расширение и совершенствование возможностей по ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Существует ряд концепций, на основе которых можно сформулировать государственную политику в области безопасности, среди которых основными являются концепции устойчивого развития и приемлемого риска. Устойчивое развитие – это комплекс мер, направленных на удовлетворение текущих потребностей человека при сохранении окружающей среды и ресурсов, чтобы будущие поколения также могли удовлетворять свои потребности.

Приемлемый риск – это приемлемый уровень риска, который обоснован с учетом экономических, социальных и экологических факторов и с которым общество готово смириться ради достижения определенных положительных результатов. Приемлемый риск не вызывает необратимых последствий.

Оценка риска является ключевым инструментом в управлении техногенной безопасностью. Она включает в себя идентификацию, анализ и оценку рисков, связанных с технологическими процессами и оборудованием. Основные этапы оценки риска включают.

1. Идентификация опасностей: выявление всех потенциальных источников опасностей, которые могут привести к авариям или инцидентам.

2. Анализ рисков: оценка вероятности возникновения опасных событий и их потенциальных последствий. Этот этап может включать как качественные, так и количественные методы анализа.

3. Оценка уровня риска: сопоставление выявленных рисков с установленными критериями приемлемости. Риски, превышающие допустимые уровни, требуют разработки мер по их снижению.

4. Управление рисками: разработка и внедрение мероприятий по снижению рисков, включая технические, организационные и образовательные меры.

5. Мониторинг и пересмотр: регулярный мониторинг состояния безопасности и пересмотр оценок рисков с учетом изменений в технологических процессах и внешней среде.

Таким образом, оценка риска позволяет не только предотвратить аварии, но и создать систему управления, которая будет адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать высокий уровень техногенной безопасности в металлургической отрасли.

В настоящее время существует недостаток разработок в области оценки качества техногенной безопасности в металлургической отрасли несмотря на то, что, как и в атомной и газовой промышленности, в металлургической отрасли также присутствуют риски аварий. Более того, многие из этих аварий приводят к значительным финансовым потерям и травмам различной степени тяжести, что также влечет за собой финансовые убытки.

За последние годы количество чрезвычайных ситуаций техногенного характера в металлургической отрасли остается на высоком уровне. Основные причины аварий включают физический износ оборудования, несвоевременное проведение ремонта, эксплуатацию оборудования с отработанным нормативным сроком, а также человеческий фактор.

В таблице представлен анализ динамики аварий на предприятиях металлургической отрасли по годам, а также данные о количестве случаев со смертельным исходом и материальном ущербе, выраженном в миллионах рублей [2-4].

Сведения о случаях аварийности, травматизмаи причиненного ущерба в млн руб.

Наименование	Количество аварий на предприятиях металлургической отрасли по годам					
	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Аварии	2	2	2	3	4	2
Смертельный травматизм	8	14	11	9	12	6
Ущерб от аварий, млн руб.	353,336	705,044	21,872	2,09	3,09	148,2
Суммарный ущерб от аварий за 6 лет, млн руб.	1233,632					

Приемлемый риск для металлургической отрасли составляет 10^{-4}, однако по данным таблицы, в некоторых случаях величина риска достигает значения 0,007, что является очень высокой степенью риска. Это значение значительно превышает приемлемый уровень, что указывает на необходимость принятия срочных мер для снижения аварийности и повышения безопасности на производстве.

Средней величиной приемлемого риска в профессиональной сфере обычно принимают $2{,}4 \cdot 10^{-4}$ гибели человека в год [3, 5-8]. Согласно данным таблицы фактическое количество погибших значительно превышает эту величину. Это свидетельствует о том, что существующие меры безопасности недостаточны и требуют пересмотра и усиления исследований в этой области.

На основании данных, представленных на рисунке, можно сделать вывод о том, что количество аварий на металлургических предприятиях не уменьшается, и показатели остаются на высоком уровне. Аналогично, уровень смертельного травматизма остается значительным.

Анализ литературы по данной тематике показывает, что в настоящее время существует острая нехватка исследований в этой области, поскольку металлургическая отрасль, подобно атомной промышленности, имеет в своем составе опасные объекты. В работе [1] упоминаются нефтеперерабатывающая, газодобывающая и атомная промышленность, однако о металлургической отрасли там практически ничего нет.

Важно учитывать, что металлургическая отрасль включает не только процесс выплавки, стали, но и все сопутствующие химические процессы, необходимые для подготовки и доведения продукта до конечного состояния. В результате взрыва на металлургическом заводе в атмосферу может быть выброшено значительное количество вредных веществ, таких как оксиды серы, оксиды азота, тяжелые металлы и пыль. По данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, выбросы таких веществ могут привести к ухудшению качества воздуха в радиусе нескольких километров от места происшествия [4, 9-11].

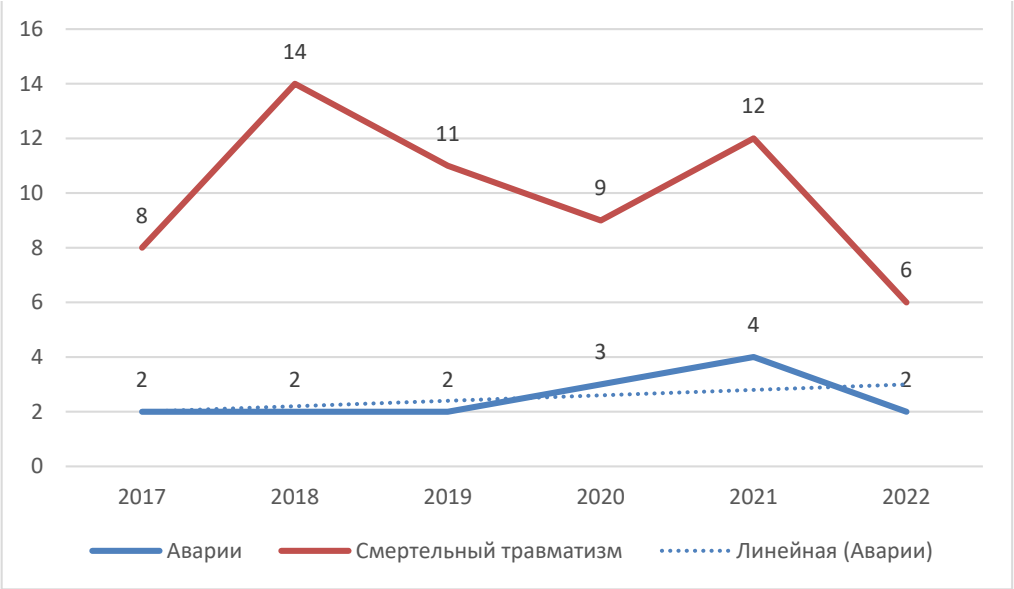


График динамики аварийности и смертельного травматизма за период с 2017 г. по 2022 г.

Таким образом, для обеспечения устойчивого развития металлургической отрасли и защиты окружающей среды необходим системный подход к оценке качества техногенной безопасности на предприятиях металлургической отрасли. В настоящее время объем таких исследований крайне ограничен [12-15], что делает необходимым проведение комплексных исследований и внедрение соответствующих мер для минимизации рисков и улучшения условий труда.

Список литературы

1. Федеральный закон Российской Федерации «О безопасности» от 28.12.2010 № 390-ФЗ. [Электронный ресурс] URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102144301 (дата обращения: 21.10.2024).

2. Отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. [Электронный ресурс] URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 21.10.2024).

3. Концепция приемлемого риска // Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. [Электронный ресурс] URL: https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/2555 (дата обращения: 21.10.2024).

4. О Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации. [Электронный ресурс] URL: https://www.mnr.gov.ru/about/ (дата обращения: 21.10.2024).

5. Извеков Ю.А. Анализ техногенной безопасности кранового хозяйства России // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 12. С. 18-19.

6. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях. Ч. 1. Основы анализа и регулирования безопасности / Научн. руковод. К.В. Фролов. М.: МГФ «Знание», 2006. 640 с.

7. Камардина Д.Д., Анцев В.Ю. Управление рисками на предприятиях текстильной промышленности // Сб. докл. IV Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении»: 18–20 апреля 2023. Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. С. 247-249.

8. Борискин О.И., Ларин С.Н., Нуждин Г.А. Охрана труда и оценка профессиональных рисков главного механика // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 177-189. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-1-1-177-189.

9. История и перспективы развития ресурсной базы / В.И. Голик, Х.Х. Кожиев, Н.М. Качурин, М.Ю. Шамрин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 3. С. 121-132.

10. Некорректная задача анализа риска опасных объектов металлургического предприятия / Ю.А. Извеков, С.И. Кадченко, Л.А. Грачева [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 2. С. 66-70. DOI: 10.17513/snt.39525.

11. Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах / М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко, О.С. Логунова [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 2. С. 103-111. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-103-111.

12. Модельный анализ характеристик ущерба сложных технических систем металлургического предприятия / Е.А. Москвина, Ю.А. Извеков, Е.М. Гугина, В.В. Шеметова // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3-2. С. 217-221.

13. Колесников Е.Ю., Филиппидис В. Проблемы риск-ориентированного подхода // Проблемы анализа риска. 2021. Т. 18. № 6. С. 84-92. DOI: 10.32686/1812-5220-2021-18-6-84-92.

14. Колдина Е.В., Минько В.М. Исследование соотношения несчастных случаев со смертельным исходом к общему производственному травматизму в Российской Федерации // Вестник молодежной науки. 2015. № 2. С. 1.

15. Полякова М.А., Извеков Ю.А., Дрягун Э.П. Использование математических моделей в области практической стандартизации // Качество. Инновации. Образование. 2023. № 5 (187). С. 69-77. DOI: 10.31145/1999-513x-2023-5-69-77.

Ильин Иван Евгеньевич, аспирант, Ivan2011.ilyin@mail.ru, Россия, Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,

Путенихина Анна Сергеевна, аспирант, anya1320062012@mail.ru, Россия, Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,

Извеков Юрий Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, yurij.izvekov@mail.ru, Россия, Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,

Шеметова Вероника Владимировна, канд. физ.-мат. наук, доцент, shemetova-vv@mail.ru, Россия, Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ANALYSIS OF TECHNOGENIC SAFETY OF THE RUSSIAN METALLURGICAL INDUSTRY

I.E. Ilyin, A.S. Putenikhina, Y.A. Izvekov, V.V. Shemetova

In the context of increasing safety requirements, the study of technogenic safety in metallurgy is becoming important. The increase in production volumes, the introduction of new technologies and the growth of competition require constant monitoring and risk assessment. The article continues the author's research. The analysis of accidents and emergencies that occurred at enterprises controlled by the territorial bodies of the Federal Service of Russia for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in the period from 2017 to 2022 was carried out. In addition, the article provides quantitative data on the damage caused over the years.

Keywords: metallurgical enterprise, metallurgy, technogenic safety, production processes, risk control and assessment.

Ilyin Ivan Evgenievich, postgraduate, Ivan2011.ilyin@mail.ru, Russia, Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Putenikhina Anna Sergeevna, postgraduate, anya1320062012@mail.ru, Russia, Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Izvekov Yury Anatolyevich, doctor of technical sciences, docent, head of the department, yurij.izvekov@mail.ru, Russia, Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Shemetova Veronica Vladimirovna, candidate of physical and mathematical sciences, docent, shemetova-vv@mail.ru, Russia, Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University

УДК 62-408.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-204-205

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ БИЕНИЯ ОСИ ШЕЙКИ ВАЛА ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ВРАЩЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

В.В. Куц, А.Н. Гречухин, А.С. Горшенина, А.В. Олешицкий

В статье предложен метод расчета величин линейных и угловых смещений оси шейки вала относительно оси её вращения применяемый при контроле геометрической точности вала методами машинного зрения. Предложен метод исключения рассчитанных смещений как источника систематических погрешностей из результатов контроля путем пересчёта координат точек границ поверхности шейки вала определяемых метолами машинного зрения. Установлено существование остаточной систематической погрешности после обработки результатов измерений, выполнена оценка влияния на эту погрешность величин линейных и угловых смещений оси шейки вала относительно оси вращения.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках поддержанного ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» гранта № 1.62.24П в соответствии со стратегией развития университета (Приоритет-2030).

Ключевые слова: машинное зрение, ось вращения вала, биение оси вала, математическое моделирование.

Одним из перспективных направлений развития современного машиностроения является применение машинного зрения для контроля качества выпускаемой продукции как с точки зрения соответствия размеров заданным предельным отклонениям, так и с точки зрения установления погрешности форм и взаимного расположения поверхностей. Это не только позволит снизить влияние человеческого фактора в производстве и процессе контроля качества, повысить операционную эффективность и пропускную способность линий, но и значительно ускорить процесс определения брака.

Делали типа вал являются самыми массово выпускающимися деталями, к которым могут предъявлять высокие требования не только к размерам их шеек, но и к погрешностям их формы и положения. В сочетании с необходимостью повышения производительности изготовления становится актуальным разработка высокопроизводительных методов контроля геометрических параметров валов, для чего авторами предлагается использовать методы машинного зрения.

В зарубежных источниках имеется ряд характерных публикаций, посвящённых этой теме. Так, в работе [1] была представлена система измерения геометрических размеров валов, основанная на машинном зрении, где для получения изображения использовалась ПЗС-камера и размер шеек валов рассчитывался по их изображению.

В статье [2] был представлен метод машинного зрения для точного измерения диаметров цилиндрических валов, показаны результаты исследования влияния на точность измерения положения камеры относительно вала, а также других факторов.

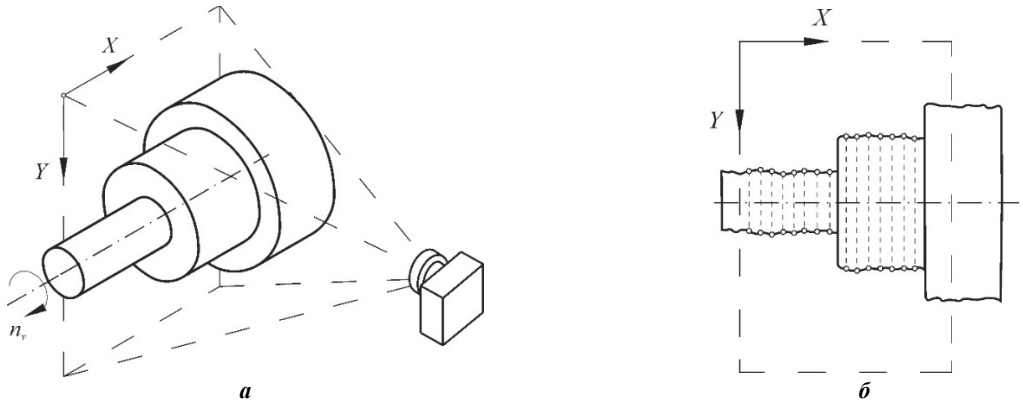
Также в работе [3] был показан метод измерения диаметра вала с помощью структурированной световой системы, состоящей из лазерного линейного источника света и камеры. При попадании линейного структурированного света на поверхность вала образовывалась световая полоса, которая являлась частью эллипса. Камера выполняла съёмку полученной полосы, и по её координатам рассчитывался диаметр вала.

В статье [4] представлен бесконтактный и высокоточный метод измерения диаметра вала, основанный на обработке цифрового изображения и не предполагающий измерение погрешностей положения формы и положения шеек валов.

В статье [5] предлагается метод измерения диаметра и максимального диаметра поворота мини-фрезы, основанный на машинном зрении, измерительная система состоит из телецентрического устройства подсветки, двустороннего телецентрического объектива, ПЗС-камеры и поворотного устройства.

Обобщая данные публикации, можно констатировать, что существует большое количество работ по контролю размеров (диаметров) шеек валов, но практически отсутствуют работы, посвящённые контролю погрешности формы и положения контролируемых шеек. По этому вопросу особый интерес представляет статья [6], где для автоматического и точного контроля состояния микроинструментов в процессе микрофрезерования рассматривается метод измерения на станке, основанный на визуализации. Предлагаемый метод позволяет измерять размер инструмента и радиальное биение шпинделя. Однако данный метод позволяет выполнить лишь приближённую оценку радиального биения и не позволяет исключить данную величину из результатов измерений, что является источником систематических погрешностей.

Для расчета погрешностей формы и положения шеек валов на основе методов машинного зрения предлагается выполнить видеосъёмку процесса вращения вала и выделение границ (координат точек) боковых сторон шеек вала на каждом кадре съемки (рис. 1).



а ***б***

Рис. 1. Схема определения границ шеек вала: а – расположение камеры; б – выделение точек на кромках

В процессе съёмки детали типа вал неизбежно возникают искажения, вызванные погрешностью взаимного положения оси измеряемой детали, фактической оси вращения вала, что приводит к биению шеек вала в процессе вращения и, как следствие, затрудняет определение многих геометрических параметров, например, диаметра, цилиндричности, реального положения оси вращения и т. д., и вносит дополнительную составляющую погрешности.

Выделим три системы координат: экрана $(X_0Y_0Z_0)$; фактической оси вращения контролируемого вала $(X_vY_vZ_v)$; вращающейся оси контролируемой шейки вала $(X_cY_cZ_c)$ (рис. 2):

Результатом выделения границ поверхности рассматриваемых шеек вала, являются сформированные для каждой шейки массивы данных, вида:

$$\left\{x_j, \left\{y_{1kj}, y_{2kj}\right\}_{k=\overline{1,K}}\right\}_{j=\overline{1,J}}, \quad (1)$$

где x_j – координаты *X*, соответствующие точкам на верхней и нижней боковой стороне рассматриваемой шейки вала в *j*-м сечении, выраженные в системе координат экрана (рис. 3); y_{1kj}, y_{2kj} – координаты *Y*, соответствующие точкам на верхней и нижней боковой стороне рассматриваемой шейки вала в *j*-м сечении, выраженные в системе координат экрана, являются проекциями верхней и нижней боковой стороны шейки вала на плоскость $Y_0 0_0 Z_0$; *k* – номер текущего кадра; *j* – номер осевого сечения шейки вала; *K* – количество кадров съёмки, соответствующее полному обороту вала; *J* – количество осевых сечений вала.

Данные массивы должны быть сформированы для каждой рассматриваемой шейки контролируемого вала.

В виду того, что системы координат фактической оси вращения и оси шейки вала не совпадают, имеется погрешность положения в виде линейных и угловых смещений системы координат оси шейки вала, полученные в массивах (1) значения координат точек будут формироваться вследствие проявления этой погрешности при вращении вала. Для исключения данной погрешности целесообразно выполнить пересчёт координат точек в систему координат неподвижной шейки вала, положение которой соответствует начальному кадру съёмки ($k=1$). Эта задача сводится к расчёту на каждом кадре съёмки матрицы перехода между системой координат оси шейки вала и системой координат экрана $A_{c0}(k)$.

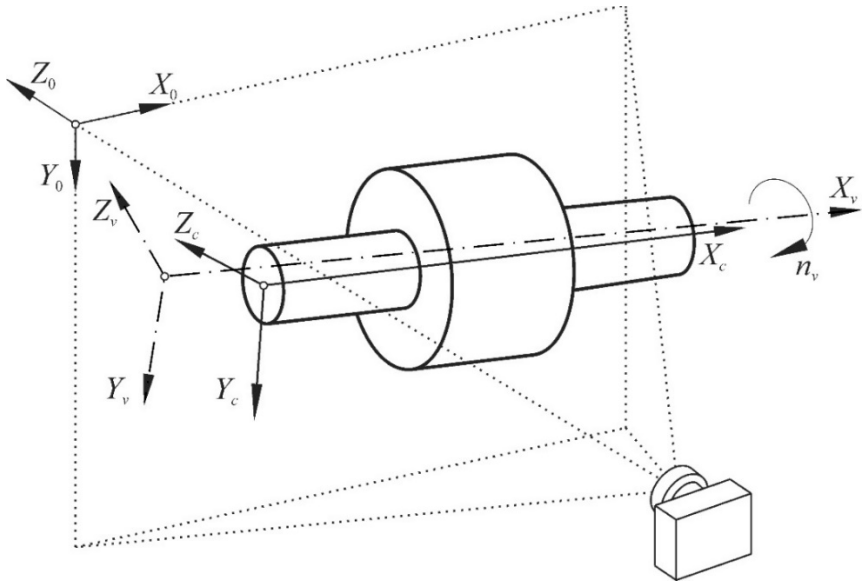


Рис. 2. Системы координат при контроле вала

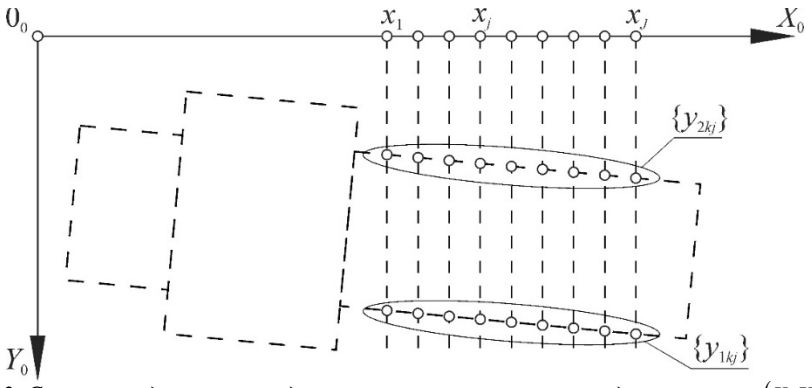


Рис. 3. Схема определения координат точек из системы координат экрана $(X_0Y_0Z_0)$

На начальном этапе выполним расчёт координат y_{vj}, являющихся оценкой положения фактической оси вращения в системе координат экрана, по формуле

$$y_{vj}=\frac{1}{2}\left(\bar{y}_{1j}+\bar{y}_{2j}\right)=\frac{1}{2K}\sum_{k=1}^{K}\left(y_{1kj}+y_{2kj}\right), \tag{2}$$

где $\bar{y}_{1j},\bar{y}_{2j}$ – средние арифметические значения координат массивов точек верхней и нижней кромок шейки вала соответственно в *j*-ом сечении.

На данном шаге поверхность шейки вала может быть представлена в виде точек

$$\bar{r}_{0kj}=A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K}\right)\cdot\left[x_j,y_{1kj}-y_{vj},0,1\right]^T. \tag{3}$$

Далее выполним расчёт смещений центра сечения шейки вала Δy_{0j} и Δz_{0j} относительно точки центра вращения вала y_{vj}, возникающих вследствие линейного смещения системы координат шейки вала (рис. 4):

$$\begin{aligned}\Delta y_{0j}=\bar{j}_0\cdot\frac{1}{K}\Bigg(&\sum_{k=1}^{K}A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K}\right)\cdot\left[0,y_{1kj}-y_{vj},0,1\right]^T+\\&+\sum_{k=1}^{K}A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K}\right)\cdot\left[0,y_{2kj}-y_{vj},0,1\right]^T\Bigg),\end{aligned} \tag{4}$$

$$\Delta z_{0j} = \bar{k}_0 \cdot \frac{1}{K}\left(\sum_{k=1}^{K} A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \cdot \left[0, y_{1kj} - y_{vj}, 0, 1 \right]^T + \right.$$
$$\left. + \sum_{k=1}^{K} A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \cdot \left[0, y_{2kj} - y_{vj}, 0, 1 \right]^T \right), \tag{5}$$

где $A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K} \right)$ – матрица поворота системы координат вокруг оси *X* на угол $-(k-1)\frac{2\pi}{K}$,

$$A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K} \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left((k-1)\frac{2\pi}{K} \right) & \sin\left((k-1)\frac{2\pi}{K} \right) & 0 \\ 0 & -\sin\left((k-1)\frac{2\pi}{K} \right) & \cos\left((k-1)\frac{2\pi}{K} \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

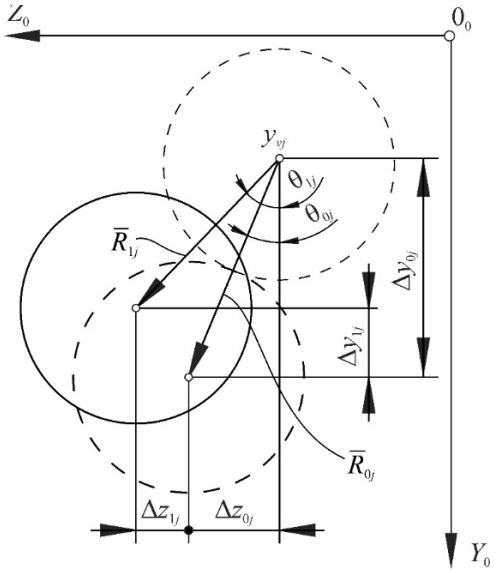


Рис. 4. Смещения центров сечений шейки вала

Величины Δy_{0j} и Δz_{0j} являются составляющими биения оси контролируемой шейки вала относительно оси вращения при контроле геометрической точности вала.

С учетом рассчитанных смещений (4) и (5) поверхность шейки вала может быть представлена в виде точек

$$\bar{r}_{1kj} = A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \cdot$$
$$\cdot \left[x_j, y_{1kj} - \left(y_{vj} + R_{0j} \cdot \cos\left(\theta_{0j} + (k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \right), 0, 1 \right]^{\mathrm{T}}, \tag{7}$$

где R_{0j} – радиус смещения предполагаемого центра *j*-го сечения с учётом (4) и (5)

$$R_{0j} = \sqrt{\Delta y_{0j}^2 + \Delta z_{0j}^2}\ ; \tag{8}$$

θ_{0j} – угол наклона предполагаемого центра *j*-го сечения относительно центра вращения y_{vj} отсчитываемый от положительного направления оси *Y* с учётом (4) и (5)

$$\theta_{0j} = \arctan\left(\frac{\Delta z_{0j}}{\Delta y_{0j}} \right). \tag{9}$$

Далее, выполним расчёт смещения центра сечения шейки вала Δy_{1j} и Δz_{1j} относительно точки $(x_j, y_{vj} + \Delta y_{0j}, \Delta z_{0j})$, возникающих вследствие углового смещения системы координат шейки вала

$$\Delta y_{1j} = \bar{j}_0 \cdot \frac{1}{K}\left(\sum_{k=1}^{K} A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \cdot \left[0, y_{1kj} - \left(y_{vj} + R_{0j} \cdot \cos\left(\theta_{0j} + (k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \right), 0, 1 \right]^{\mathrm{T}} + \right.$$
$$\left. + \sum_{k=1}^{K} A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K} \right) + \left[0, y_{2kj} - \left(y_{vj} + R_{0j} \cdot \cos\left(\theta_{0j} + (k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \right), 0, 1 \right]^{T} \right), \tag{3}$$

$$\Delta z_{1j} = \bar{k}_0 \cdot \frac{1}{K}\left(\sum_{k=1}^{K} A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \cdot \left[0, y_{1kj} - \left(y_{vj} + R_{0j} \cdot \cos\left(\theta_{1j} + (k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \right), 0, 1 \right]^{\mathrm{T}} + \right.$$
$$\left. + \sum_{k=1}^{K} A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \cdot \left[0, y_{2kj} - \left(y_{vj} + R_{0j} \cdot \cos\left(\theta_{1j} + (k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \right), 0, 1 \right]^{T} \right). \quad (4)$$

Величины угловых смещений системы координат оси шейки вала могут быть вычислены по формулам

$$\beta_z = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^{J-1} \arccos\left(\frac{\bar{p}_{1yj} \cdot \bar{p}_{2yj}}{\left|\bar{p}_{1yj}\right| \cdot \left|\bar{p}_{2yj}\right|} \right) \quad (9)$$

и

$$\beta_y = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^{J-1} \arccos\left(\frac{\bar{p}_{1zj} \cdot \bar{p}_{2zj}}{\left|\bar{p}_{1zj}\right| \cdot \left|\bar{p}_{2zj}\right|} \right), \quad (10)$$

где $\bar{p}_{1yj}$ – проекция вектора, определяющего направление оси вращения вала в *j*-м сечении, на плоскость $X_0 0_0 Y_0$:

$$\bar{p}_{1yj} = \left[x_{j+1} - x_j, \left(y_{v(j+1)} - y_{vj} \right) + \left(\Delta y_{0(j+1)} - \Delta y_{0j} \right), 0, 0 \right]^{\mathrm{T}}; \quad (11)$$

$\bar{p}_{2yj}$ – проекции вектора, определяющего направление оси шейки вала в j-м сечении, на плоскость $X_0 0_0 Y_0$:

$$\bar{p}_{2yj} = \begin{bmatrix} x_{j+1} - x_j \\ \left(y_{v(j+1)} - y_{vj} \right) + \left(\Delta y_{0(j+1)} - \Delta y_{0j} \right) + \left(\Delta y_{1(j+1)} - \Delta y_{1j} \right) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$\bar{p}_{1zj}$ – проекция вектора, определяющего направление оси вращения вала в *j*-м сечении, на плоскость $X_0 0_0 Z_0$:

$$\bar{p}_{1zj} = \left[x_{j+1} - x_j, 0, \Delta z_{0(j+1)} - \Delta z_{0j}, 0 \right]^{\mathrm{T}}; \quad (13)$$

$\bar{p}_{2zj}$ – проекции вектора, определяющего направление оси шейки вала в *j*-м сечении, на плоскость $X_0 0_0 Z_0$:

$$\bar{p}_{2zj} = \left[x_{j+1} - x_j, 0, \left(\Delta z_{0(j+1)} - \Delta z_{0j} \right) + \left(\Delta z_{1(j+1)} - \Delta z_{1j} \right), 0 \right]^{\mathrm{T}}. \quad (14)$$

С учетом рассчитанных смещений (7) и (8) поверхность шейки вала может быть представлена в виде точек

$$\bar{r}_{2kj} = A^{\{4\}}\left(-(k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \cdot \left[x_j, y_{1kj} - \left(y_{vj} + R_{1j} \cdot \cos\left(\theta_{1j} + (k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \right), 0, 1 \right]^{\mathrm{T}}, \quad (15)$$

где R_{1j} – радиус смещения предполагаемого центра *j*-го сечения с учётом (4), (5), (7) и (8):

$$R_{1j} = \sqrt{\left(\Delta y_{0j} + \Delta y_{1j} \right)^2 + \left(\Delta z_{0j} + \Delta z_{1j} \right)^2}; \quad (16)$$

θ_{1j} – угол наклона предполагаемого центра *j*-го сечения относительно центра вращения y_{vj}, отсчитываемый от положительного направления оси *Y* с учётом (4), (5), (7) и (8):

$$\theta_{1j} = \arctan\left(\frac{\Delta z_{0j} + \Delta z_{1j}}{\Delta y_{0j} + \Delta y_{1j}} \right). \quad (17)$$

С учётом полученных смещений центров сечений шейки вала, можно рассчитать координаты этих центров на каждом кадре съёмки в системе координат экрана

$$\bar{r}_{ckj} = A^{\{2\}}\left(y_{vj} \right) \cdot A^{\{4\}}\left(\theta_{1j} + (k-1)\frac{2\pi}{K} \right) \cdot \left[x_j, R_{1j}, 0, 1 \right]^{T}. \quad (18)$$

Для заданного *k*-го кадра съёмки направление вращающейся оси шейки вала зададим в виде вектора, рассчитываемого по формуле

$$\bar{q}_{ck} = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^{J-1} \frac{\bar{r}_{ck(j+1)} - \bar{r}_{ckj}}{\left| \bar{r}_{ck(j+1)} - \bar{r}_{ckj} \right|}. \quad (19)$$

При условии расположения начала системы координат вращающейся шейки вала в центре первого сечения, определим матрицу $A_{c0}(k)$ по следующим векторам:

вектору, задающему положительное направление оси Y_c

$$\bar{j}_{c0} = \left[-\bar{j}_0 \cdot \bar{q}_{ck}, \bar{i}_0 \cdot \bar{q}_{ck}, 0, 1 \right]^{T};$$

вектору, задающему положительное направление оси Z_c

$$\bar{k}_{c0} = \bar{k}_0;$$

вектору, определяющему положения начала системы координат

$$\bar{r}_{c0} = \bar{r}_{ck,1}.$$

В работах [7, 8] приводится методика данного расчёта.

По известной матрице $A_{c0}(k)$ можно пересчитать координаты выявленных методами машинного зрения точек верхних и нижних боковых сторон для всех шеек вала (1), по формулам

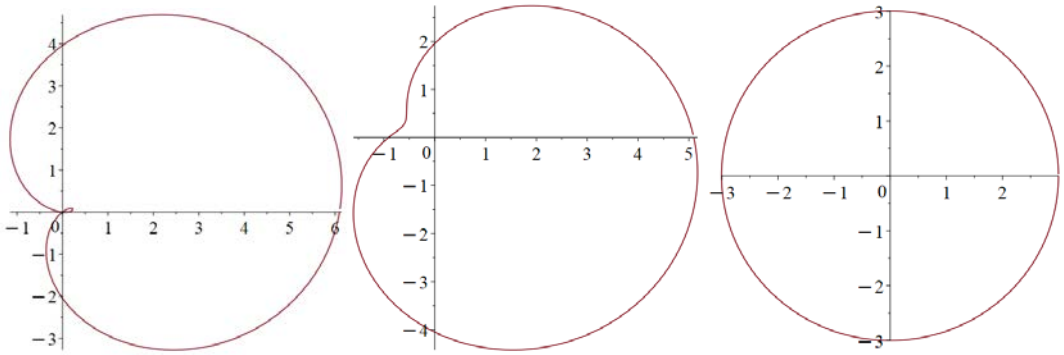
$$x^*_{1j} = \bar{i} \cdot A^{-1}_{c0}(k)\left[x_j, y_{1kj}, 0, 1\right]^{\mathrm{T}}; \quad (20)$$

$$y^*_{1j} = \bar{j} \cdot A^{-1}_{c0}(k)\left[x_j, y_{1kj}, 0, 1\right]^{\mathrm{T}}; \quad (21)$$

$$x^*_{2j} = \bar{i} \cdot A^{-1}_{c0}(k)\left[x_j, y_{2kj}, 0, 1\right]^{\mathrm{T}}; \quad (22)$$

$$y^*_{2j} = \bar{j} \cdot A^{-1}_{c0}(k)\left[x_j, y_{2kj}, 0, 1\right]^{\mathrm{T}}. \quad (23)$$

Для оценки адекватности предложенных зависимостей был выполнен расчёт в соответствии с предложенной методикой для координат точек нижних и верхних боковых сторон цилиндра, рассчитанных на основе методики, приведённой в [9]. Расчёт выполнялся для шейки вала диаметром 6 мм и длиной 60 мм при разных значениях линейных и угловых смещений системы координат оси шейки вала. На рис. 5 показано изменение сечения шейки вала, при заданных линейных смещениях системы координат шейки вала по оси Y $dy = 1$ мм, по оси Z $dz = 2$ мм и углах поворота вокруг оси Y $\beta_y = 1°$ и вокруг оси Z $\beta_z = 2°$.



а ***б*** ***в***

Рис. 5. Сечения шейки вала, рассчитанные: а – по формуле (3); б – по формуле (7); в – по формуле (9)

Очевидно, что при последовательном расчёте и учёте смещений центров сечений шейки вала, форма сечения приближается к кругу. Для оценки погрешности пересчёта координат точек поверхности шейки вала в систему координат неподвижной шейки вала по формулам (20)-(23) воспользуемся двумя величинами:

величиной наибольшего отклонения точки поверхности от радиуса шейки вала в j-м сечении

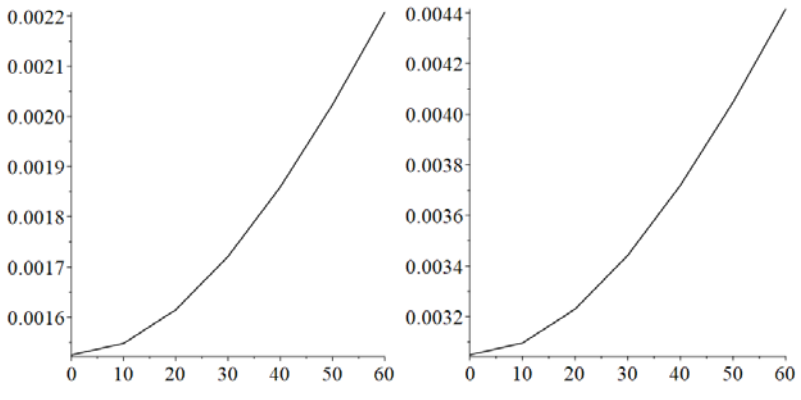
$$ER_{\max j} = \max\left(\left\{y^*_{1kj} - R_s\right\}_{k=\overline{1,..,K}}\right); \quad (24)$$

величиной размаха точек в j-м сечении

$$R_j = \max\left(\left\{y^*_{1kj}\right\}_{k=\overline{1,..,K}}\right) - \min\left(\left\{y^*_{1kj}\right\}_{k=\overline{1,..,K}}\right), \quad (25)$$

где R_s – радиус шейки вала.

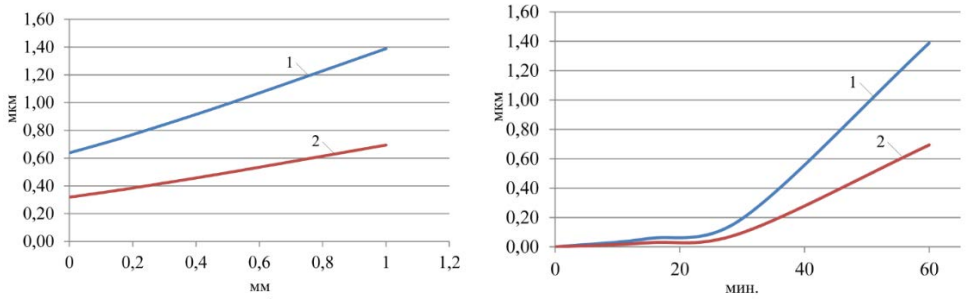
На рис. 6 показаны графики изменения величин $ER_{\max j}$ и R_j для сечений шейки вала, вычисленные по формулам (18) и (19), при заданных линейных смещениях системы координат шейки вала по оси Y $dy = 1$ мм, по оси Z $dz = 2$ мм и углах поворота вокруг оси Y $\beta_y = 1°$ и вокруг оси Z $\beta_z = 2°$.



а ***б***

Рис. 6. Графики изменения величин: а – $ER_{\max j}$; б – R_j

Следует отметить, что несмотря на большие значения погрешности положения шейки вала относительно фактической оси вращения, величина отклонения точек шейки вала от номинального радиуса шейки не превышает 2,2 мкм, а величина размаха не превышает 4,4 мкм. На рис. 7 показаны графики изменения $ER_{\max j}$ и R_j при различных значениях линейных (рис. 7, а) и угловых (рис. 7, б) смещениях системы координат шейки вала.



а *б*

Рис. 7. Изменения величин $ER_{\max j}$ ***и*** R_j ***: а – при линейных смещениях системы координат шейки вала; б – угловых смещениях системы координат шейки вала; 1 – величина*** $ER_{\max j}$ ***; 2 – величина*** R_j

Можно утверждать, что при малых величинах смещений системы координат, для линейных смещений не более 0,5 мм и угловых смещениях не более 30 мин. (0,5°) величина наибольшего отклонения не превышает 1 мкм.

Таким образом, предложенный метод расчета позволяет выполнить оценку величины биения оси контролируемой шейки вала относительно оси его вращения при контроле геометрической точности методами машинного зрения, а также позволяет исключить величину биения из результатов измерений как источник систематической погрешности, что позволяет обеспечить требуемую точность контроля.

Список литературы

1. Li B. Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision // Journal on Image and Video Processing. 2018. V. 101. DOI: 10.1186/s13640-018-0339-x.

2. Wei G., Tan Q. Measurement of shaft diameters by machine vision // Applied optics. 2011. V. 50. P. 3246-3253. DOI: 10.1364/AO.50.003246.

3. A Model of Diameter Measurement Based on the Machine Vision / Q. Tan, Y. Kou, J. Miao, S. Liu, B. Chai // Symmetry. 2021. V. 13(2). P. 187. DOI: 10.3390/sym13020187.

4. Shaft diameter measurement using a digital image / Q. Sun, Y. Hou, Q. Tan, C. Li // Optics and Lasers in Engineering. 2014. V. 55. P. 183-188.

5. Mini milling cutter measurement based on machine vision / G. Shuxia, Z. Jiancheng, J. Xiaofeng, P. Yin, W. Lei // Procedia Engineering. 2011. V. 15. P. 1807-1811.

6. X. Liu, X. Zhang, B. Shang, X. Chi. Study on vision based on-machine micro tool measurement method // Advances in Computer Science Research. Proceedings of the 2015 Joint International Mechanical, Electronic and Information Technology Conference. 2015. V. 12. DOI: 10.2991/jimet-15.2015.202.

7. Проектирование ротационного инструмента с конструктивной подачей для обработки лопаток турбин / В. В. Куц, Л. Н. Лыкова, М. С. Разумов, Ю. А. Мальнева. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2021. 109 с.

8. Куц В.В., Мальнева Ю.А., Горохов А.А. Проектирование дисковых фрез с конструктивной радиальной подачей для обработки профильных валов. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2015. 131 с.

9. Куц В.В. Горшенина А.С. Моделирование процесса оценки положения базовой оси вращения вала и центров сечений поверхности шеек вала методами машинного зрения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 70-76.

Куц Вадим Васильевич, д-р техн. наук, профессор, kuc-vadim@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Гречухин Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, agrechuhin@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Горшенина Анастасия Сергеевна, студент, sh3gorchenina@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Олешицкий Алексей Вячеславович, преподаватель, oav46@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет

DETERMINATION OF THE RUNOUT VALUE OF THE SHAFT NECK AXIS RELATIVE TO THE AXIS OF ROTATION WHEN CONTROLLING GEOMETRIC ACCURACY USING MACHINE VISION METHODS

V.V. Kutz, A.N. Grechukhin, A.S. Gorshenina, A.V. Oleshitsky

The article proposes a method for calculating the values of linear and angular displacements of the shaft neck axis relative to the axis of its rotation used to control the geometric accuracy of the shaft by machine vision methods. A method

is proposed to exclude calculated displacements as a source of systematic errors from the control results by recalculating the coordinates of the points of the boundaries of the shaft neck surface determined by machine vision metrics. The existence of a residual systematic error after processing the measurement results was established, and the influence of linear and angular displacements of the shaft neck axis relative to the axis of rotation on this error was estimated.

Key words: machine vision, shaft rotation axis, shaft axis runout, mathematical modeling.

Kuts Vadim Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, kuc-vadim@yandex.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Grechukhin Alexander Nikolayevich, candidate of technical sciences, docent, agrechuhin@mail.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Gorshenina Anastasia Sergeevna, student, sh3gorchenina@yandex.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Oleshitskii Aleksei Vyacheslavovich, teacher, oav46@yandex.ru, Russia, Kursk, South-West State University

УДК 658.511
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-211-212

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССА ПЕРЕВОЗКИ НЕГАБАРИТНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ

К.С. Буяров, Н.В. Анцева, В.Ю. Анцев, А.Д. Горынин

Проведен анализ и формализация процесса организации перевозки негабаритных транспортно-технологических машин автомобильным транспортом, приведен конкретный пример транспортировки такого груза с указанием основных сложностей при организации процесса и предложены ряд мероприятий по его оптимизации и повышения качества на основе применения риск-ориентированного подхода.

Ключевые слова: управление качеством, логистика, управление процессом, управление рисками, перевозка, негабаритный груз.

Современный мир постоянно расширяется, люди быстрыми темпами осваивают новые территории. В связи с этим остро встал вопрос о перевозке транспортно-технологических машин. Данные перевозки зачастую совершаются как автомобильным транспортом, так и железнодорожным [1, 2]. Для грузовых перевозок есть правила, в которых чётко прописаны размеры и вес груза, при соблюдении которых перевозка может совершаться в штатном режиме. Для автомобильных перевозок эти правила выглядят следующим образом: длина автопоезда не должна превышать 20 метров, ширина не более 2,5 метров, максимальная высота 4 метра, общий вес автопоезда не более 38 тонн. Однако при перевозке транспортно-технологических машин не всегда получается вписываться в эти параметры, так как эти машины зачастую имеют массивную конструкцию и навесное оборудование, которое не всегда возможно демонтировать. Перевозка таких машин называется негабаритной [3, 4].

При организации перевозок негабаритных грузов, особенно на дальние расстояния, основным критерием оптимальной транспортировки является не выбранный транспорт или время в пути, а маршрут, учитывающий ширину дороги, ее загруженность и другие параметры, требующие точных замеров и расчетов. Например, если высота груза (с учетом прицепа) выше гипотетического моста на пути следования, то необходимо проложить маршрут в объезд этого моста. Также на пути следования может находится Линия электропередачи (ЛЭП) с высотой проводов над землей ниже, чем высота груза. Тогда ЛЭП отключают во избежание возможных катастроф. При чем, для организации отключения ЛЭП или временного снятия провода на железнодорожных переездах, автопоезд должны сопровождать автовышки и экипаж электриков. Особый случай – обеспечение безопасности дорожного движения, например, если ширина груза превышает 4 м или длина автопоезда – 30 м, то необходимо сопровождение машины ГИБДД, т. к. автопоезд может перекрыть движение в обе стороны [3].

Поэтому перевозка крупногабаритных грузов – дело довольно дорогое, хлопотное и требующее получения спецразрешения и многочисленных согласований в Росавтодоре, органах ГИБДД, организациях, управляющих энергосетями и мостами. Однако для обеспечения качества и гарантии безопасности негабаритных перевозок необходимо выполнение еще ряда условий. В частности, учет износа транспортного оборудования, который в условиях эксплуатации (например, при перепаде высот на горных серпантинах) оказывается выше допустимого. Также в рамках согласования маршрута в отдельных случаях требуется проводить обследование улиц и дорог по маршруту с целью определения геометрических параметров и возможности перевозки груза указанных габаритов. Ответственность за обследование улиц и дорог по маршруту Росавтодор фактически переложил на перевозчиков, которые зачастую игнорируют необходимость данного обследования и сначала принимают заказ на перевозку, а потом начинают принимать решение о его реализации. Это говорит о том, что транспортировка негабаритного груза – важная и сложная задача, неправильное решение которой создает угрозу безопасности другим участникам дорожного движения.

Также при организации транспортировки необходимо учитывать тип негабаритного груза, который бывает тяжеловесным и крупногабаритным. Транспортировку таких грузов организуют с учетом их особенностей и в соответствии с законодательством Российской Федерации. Данный процесс является очень сложным во всех отношениях, начиная от документооборота, заканчивая подготовкой транспортного средства.

Далее приведен пример организации негабаритной перевозки с точки зрения перевозчика, который самостоятельно ищет заказчиков на перевозку. Сделать это можно, например, на сайте ATI.SU, представляющем собой биржу грузоперевозок и крупнейшую экосистему сервисов для транспортной логистики в России и СНГ (рис. 1).

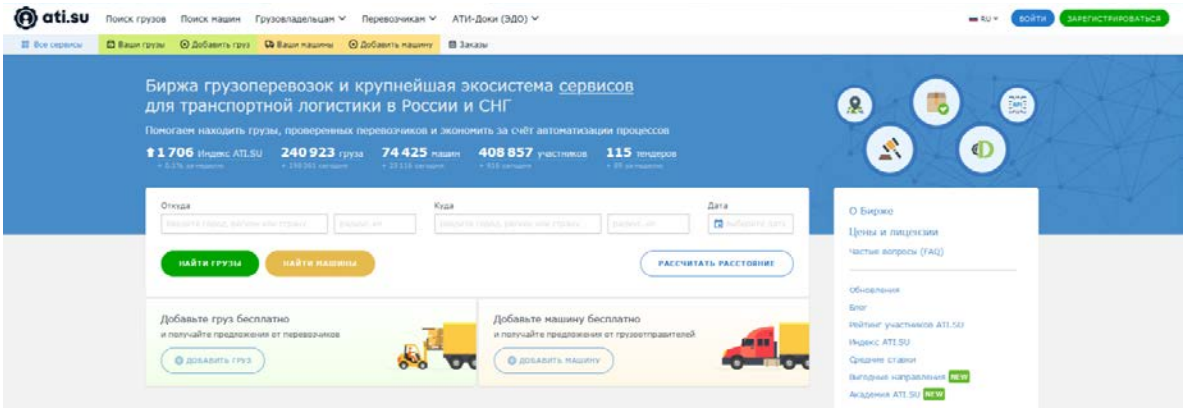


Рис. 1. Внешний вид сайта ATI.SU

ATI.SU помогает обмениваться информацией между перевозчиками, экспедиторами и грузоотправителями. База данных ATI.SU содержит заявки на перевозку грузов, сообщения о наличии свободного транспорта и информацию об участниках рынка. Размещаемая участниками ATI.SU информация мгновенно становится доступна всем пользователям этого сервиса. Биржей грузоперевозок ATI.SU пользуются более 200 тысяч фирм России, стран СНГ и Евросоюза. Ежедневно в базе данных появляется около 150 тысяч новых заявок на перевозку грузов и 100 тысяч предложений транспорта. Чаще всего на этом сайте размещается заявка на перевозку груза без стоимости самой перевозки, т. к. оценить ее стоимость заранее очень сложно. Чаще всего при перевозке негабаритного груза обычным низкорамным тралом устанавливается цена 230 рублей за километр – это цена за стандартную негабаритную перевозку, где не требуется наличие машины прикрытия, сопровождения машинами ДПС, поднятия электрических проводов, а маршрут движения уже известен и отлажен. Вообще большинство маршрутов в сфере негабаритных перевозок уже отлажены годами, потому что большую часть в этом направлении занимают перевозки комбайнов. Например, из Ростовской области чаще всего комбайны везут в Краснодарский край, а уже оттуда далее в Ставропольский край.

Ситуация кардинально меняется если необходима перевозка по нестандартному маршруту. Например, на портале ATI.SU размещен заказ на перевозку груза по маршруту Тула-Архангельск. Груз в данном случае – это две машины ДТ-30 «Витязь». ДТ-30 «Витязь» это – двухзвенный вездеход на гусеничном ходу, предназначенный для транспортировки в сложных климатических условиях Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока, Арктики и Антарктики на грунтах с низкой несущей способностью (болото, снежная целина, бездорожье, пересечённая лесистая местность) при температуре окружающей среды от минус 50 °С до плюс 40 °С (рис. 2) [5]. У этих технологических машин имеются прицепы и предусматривается перевозка сцепкой. Габариты груза в снаряженном виде: длина – 16,2 метра, ширина – 3,1 метр, высота – 3,3м. Масса в снаряженном состоянии 30 тонн.



Рис. 2. Машина «Витязь» Арктического назначения

Таким образом габариты по ширине превышены. Чтобы не превысить габариты по высоте, необходимо использовать низкорамный трал, желательно с аппарелями, чтобы машина смогла заехать на него своим ходом. Самая большая проблема – длина, которая превышает длину стандартного полуприцепа (13 м) на 3,2 м. В этом случае

может помочь полуприцеп с изменяемой длинной платформы, например, четырёхосный низкорамный полуприцеп Broshuis (рис. 3).



Рис. 3. Четырёхосный низкорамный полуприцеп Broshuis

Четырёхосный низкорамный полуприцеп Broshuis имеет следующие характеристики: рабочая площадка 12 метров; телескоп 9,5 метров; металлизированная, усиленная конструкция всего полуприцепа. Страна-производитель: Голландия (Нидерланды). Завод – производитель: BROSHUIS BV. Общее описание: 4 оси, седельно-раздвижной полуприцеп, чистая грузоподъемность: до 66,5 т, длина полуприцепа 15 950 мм, длина полуприцепа в раздвижении 25 450 мм, длина телескопического раздвижения 9 500 мм, длина погрузочной площадки 11 920 мм, длина ССУ/Гузнека 3 950 мм, расстояние между осями 1 670 мм, ширина 2 540 мм, уширители с каждой стороны на 250 мм, высота седла по желанию (выставляется с помощью регулировочных болтов). Имеются и аналогичные отечественные решения, представленные, например, в [6].

Груз перед перевозкой необходимо закрепить в полуприцепе. В данном случае можно использовать цепи. Особое внимание уделяется той части груза, которая находится на так называемом «гусаке». Лучше всего для данного случая подходят цепи 8 класса (высокопрочные), с рабочей нагрузкой 4,25 т, нагрузкой на разрыв 17 т. С помощью четырёх таких цепей крепится часть автомашины на «гусаке» трала и ещё две цепи используются для закрепления машины на основной платформе.

Весь маршрут будет пролегать по дорогам общего пользования, поэтому использование тягача с повышенной проходимостью необязательно. Для такой перевозки в автопарке рассматриваемого перевозчика имеется тягач Volvo FH-Truck третьего поколения с двигателем мощностью 420 лошадиных сил и роботизированной коробкой передач. Снаряженный вид состава представлен на рис. 4.



Рис. 4. Снаряженный вид состава

Далее осуществляется процесс получения специального разрешения с оформлением соответствующих документов. Первоначально определяются области Российской Федерации, через которые пролегает маршрут, и владельцы конкретных участков дорог. В данном случае это дороги, находящиеся на территориях Тульской, Московской, Ярославской, Костромской, Вологодской и Архангельской областей.

Отправная точка маршрута находится в городе Туле и далее маршрут проходит по трассе М-4 до Москвы. За все дороги отвечает Государственная компания «Российские автомобильные дороги» – Автодор. В Тульской области отделение Автодора отсутствует, поэтому функцию исполняющего органа выполняет Орловское отделение Автодора. Всего несколько лет назад приходилось ездить в город Орёл для подачи заявления, сейчас всё это возможно сделать с помощью сайта Госуслуг (рис. 5-6) [7].

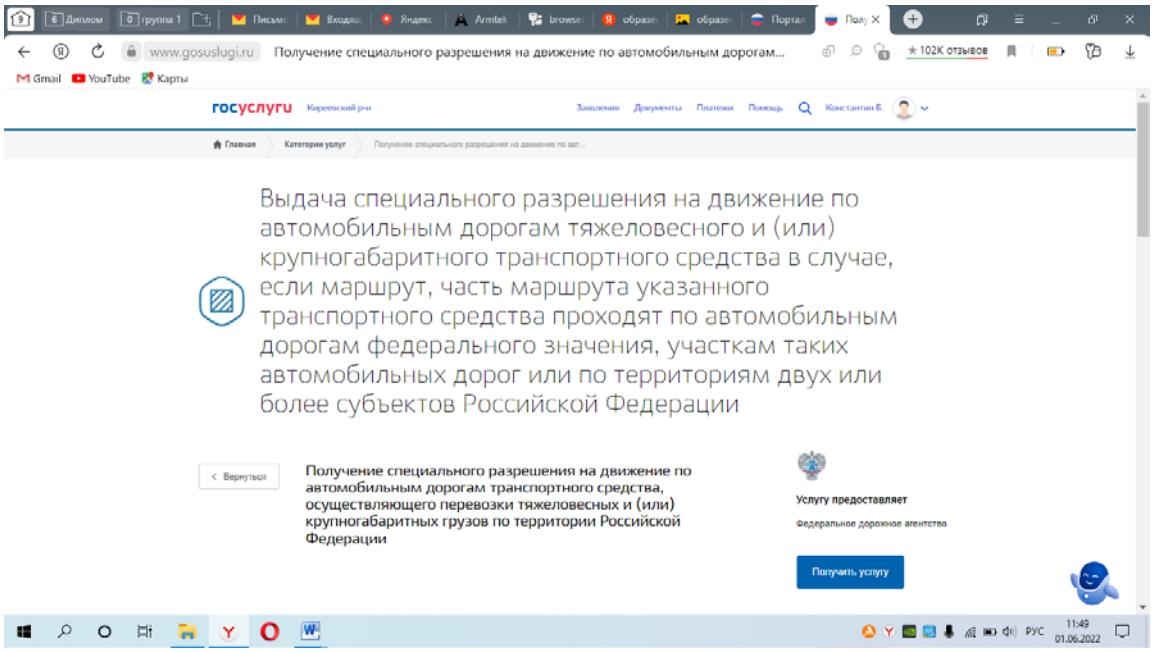


Рис. 5. Внешний вид сайта Госуслуг

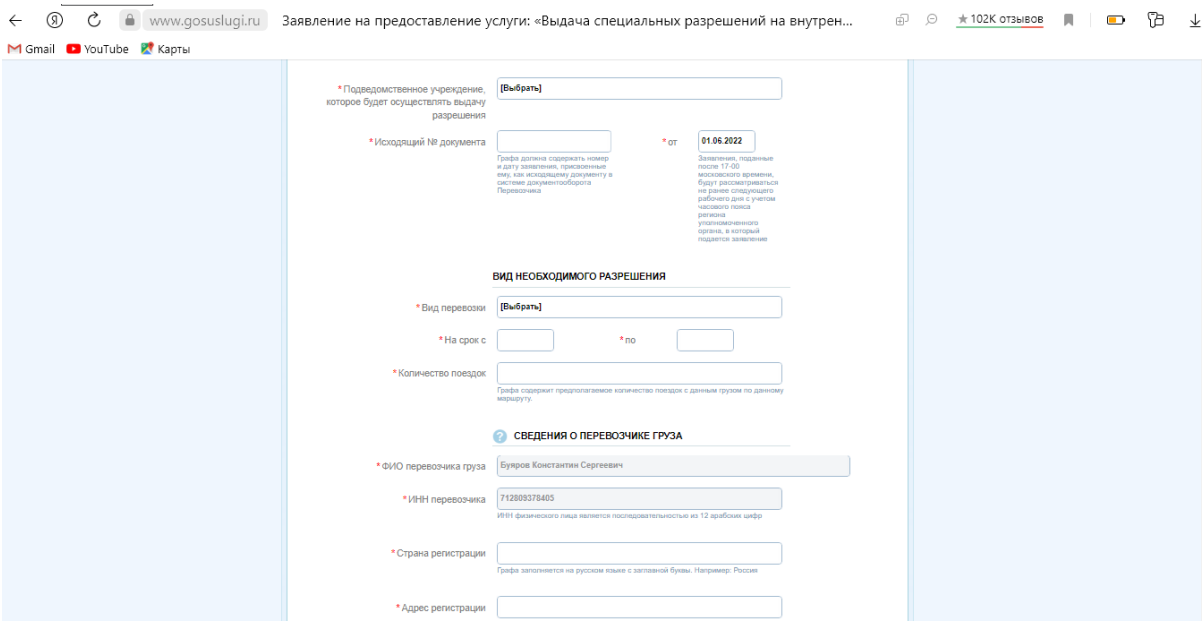


Рис. 6. Подача заявления на получение спецразрешения на сайте Госуслуг

Необходимо заполнить все необходимые графы, что сделать довольно просто. Самое сложное в этой процедуре, как правило, провести правильный расчет нагрузки на ось. В данном случае максимальная нагрузка на ось не должна превышать 9 т.

Расчёт обязательно сопровождается схематичным изображением. Также обязательно прикладывается изображение схематичного расположения груза в кузове и места его закрепления.

Помимо чертежей необходимо предоставить ещё обширный список документов: акт демонтажа, в котором указывается, в каком состоянии будет перевозиться транспортно-технологическая машина, какие агрегаты будут сниматься, с помощью каких измерительных приборов измерены габариты транспортно-технологической машины и на основании каких ГОСТ.

Так же необходимо предоставить три информационных письма. В первом письме описываются условия перевозки. Во втором письме указываются начальная и конечная точки перевозки техники. В третьем письме обязательно нужно указать, как будет перевозиться техника, в каком состоянии, с навесным оборудованием, либо частично снятым, либо с полностью демонтированным.

Так же необходимо приложить Паспорт самоходной машины и паспорт транспортного средства. Обязательно нужно указать какие технические требования будут соблюдены при совершении данной перевозки.

Последним пунктом в этом списке требований идёт письмо с описанием всех технических характеристик перевозимого транспортно-технологического средства.

После заполнения всех полей и прикрепления всех документов заявка отправляется на проверку. Такую процедуру необходимо выполнять со всеми областями Российской Федерации, через которые проходят участки дороги рассматриваемого маршрута. В случае, если служащие Автодора не уверены в каком-то из участков (что не хватит места для поворота или состав займёт слишком много места на проезжей части), то в этом случае будет нужно готовить проект по данному маршруту с выездом на место, фотографированием необходимых участков, замеров обочины, проезжей части и т. д.

В результате полный проект документации в данном примере составит 34 страницы машинописного текста с изображениями. Упростить данную процедуру можно только с помощью внедрения средств автоматизации расчетов и формирования необходимой документации. К сожалению, на данный момент специализированных средств нет, и для расчета маршрута используются, например, Яндекс-карты (рис. 7) [8].

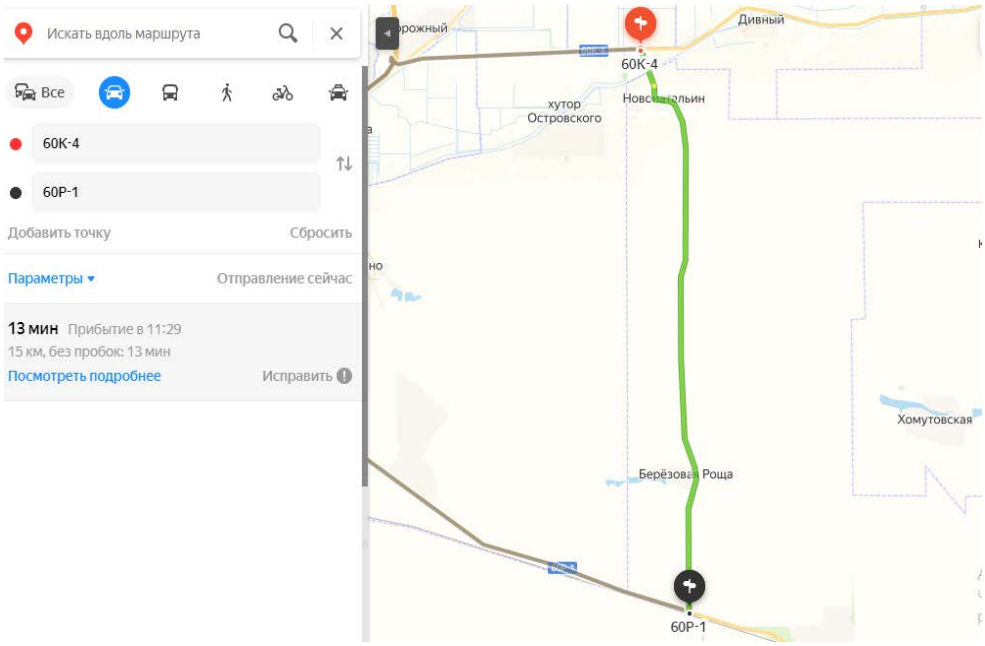


Рис. 7. Пример фотоматериала прокладки и расчета маршрута с использованием Яндекс-карт

Проверить маршрут на месте по запросу Автодора в настоящее время возможно, только приехав в нужную точку маршрута самостоятельно (рис. 8).

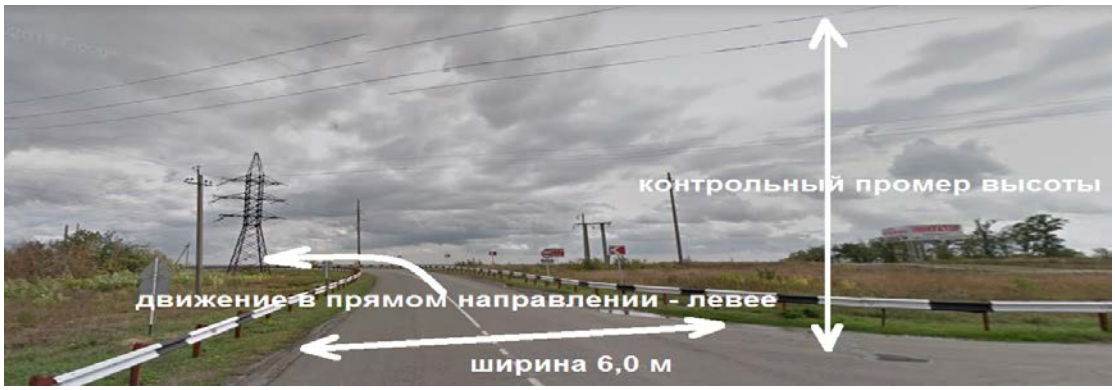


Рис. 8. Пример фотоматериала проверки возможности проезда состава

Окончательный пакет документов можно сформировать в любом текстовом редакторе, например, в MSWord.

Проведенный анализ показывает, что процесс перевозки негабаритных транспортно-технологических машин автомобильным транспортом сопровождается оформлением большого количества документации и выполнения различных расчетных операций. Поэтому для совершенствования управления данным процессом на основе выполненной его формализации с целью повышения качества оказываемых услуг по перевозке негабаритных грузов

целесообразно использование современных средств автоматизации для проведения необходимых расчетов и оформления сопроводительной документации. При этом рекомендуется применение методики управления процессами на основе риск-ориентированного подхода [9-12], что позволит существенно сократить время организации транспортировки и снизь сопутствующие риски. На реализацию предложенного подхода направлены дальнейшие исследования в этой области.

Список литературы

1. Организация и управление потоками грузопассажирских перевозок в транспортной компании / Н.А. Владимиров, А.Н. Шафорост, П.В. Витчук [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 4. С. 323-329.

2. Оптимизация транспортно-логистических процессов транспортной компании / А.И. Юхин, А.Н. Шафорост, В.Ю. Анцев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 2. С. 538-545.

3. Русский негабарит: как перевозят сверхтяжёлые грузы [Электронный ресурс] // TechInsider [сайт]. URL: https://www.techinsider.ru/technologies/11284-russkiy-negabarit-tyazhesti (дата обращения: 08.09.2024).

4. Советы по перевозке негабаритных грузов [Электронный ресурс] // АНО «Гарант» [сайт]. URL: https://ano-garant.ru/gabarity-perevozki-gruzov-avtomobilnym-transportom (дата обращения: 08.09.2024).

5. Ильин А. У «Витязей» нет соперников // Военный парад. 2001. Т. 45, № 03. С. 78-79.

6. Активный автопоезд с изменяемой колесной базой / С.А. Плахов, А.С. Котков, А.И. Пономарев, А.Д. Горынин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 317-323.

7. Портал государственных услуг Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: https://www.gosuslugi.ru (дата обращения: 08.09.2024).

8. Яндекс Карты – транспорт, навигация, поиск мест [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.ru.maps (дата обращения: 08.09.2024).

9. Актуальные вопросы управления техническими рисками в производственных системах / В.Н. Козловский, А.Г. Ивахненко, Д.И. Панюков [и др.]. Тула, 2022. 302 с.

10. Разработка подхода к расчёту рисков на основе функциональной модели IDEF0 / А.А. Жиляев, А.Г. Ивахненко, О.В. Исламова [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 4. С. 324-327.

11. Использование функциональной модели IDEF0 для расчёта рисков / О.В. Аникеева, А.А. Жиляев, А.Г. Ивахненко [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 5 (355). С. 89-98.

12. Анцев В.Ю., Толоконников А.С. Горынин А.Д. Стандартизация в области оценки рисков при проектировании грузоподъемных кранов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 12: в 2 ч. 2013. Ч. 1. С. 223-229.

Буяров Константин Сергеевич, студент, bujaroff2010@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Анцева Наталья Витальевна, канд. техн. наук, доцент, n.anzeva@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Анцев Виталий Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, anzev@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Горынин Алексей Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент, lexuss-22@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

QUALITY MANAGEMENT OF OVERSIZED TRANSPORT-TECHNOLOGICAL MACHINES TRANSPORTATION PROCESS BY ROAD TRANSPORT

K.S. Buyarov, N.V. Antseva, V.Yu. Antsev, A.D. Gorynin

The analysis and formalisation of the process of organisation of transportation of oversized transport-technological machines by motor transport is carried out, a concrete example of transportation of such cargo with indication of the main difficulties in the process organisation is given and a number of measures for its optimisation and quality improvement on the basis of application of risk-oriented approach are offered.

Key words: quality management, logistics, process management, risk management, transportation, oversized cargo.

Buyarov Konstantin Sergeevich, student, bujaroff2010@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Antseva Natal'ya Vital'evna, candidate of technical sciences, docent, n.anzeva@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Antsev Vitaliy Yuryevich, doctor of technical science, professor, manager of department, anzev@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Gorynin Alexey Dmitrievich, candidate of technical science, docent, lexuss-22@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.771:004.056.52
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-217-218

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО ВЫЯВЛЕНИЯ HTTP-ТУННЕЛИРОВАНИЯ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.С. Подшибякин, О.М. Степанюк

Данная научная статья посвящена разработке и реализации метода оперативного выявления использования технологии HTTP-туннелирования в сетевом трафике информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС). В исследовании рассматриваются особенности, связанные с HTTP-туннелированием, проводится сравнительный анализ существующих методов обнаружения и предлагается новый подход, основанный на комплексном анализе сетевого трафика. Представлена практическая реализация технологии HTTP-туннелирования с использованием разработанного клиент-серверного программного комплекса, а также предложено собственное средство детектирования туннелирования с применением библиотеки Scapy. Результаты исследования демонстрируют эффективность представленного подхода в выявлении подозрительной активности и потенциальных угроз безопасности, связанных с HTTP-туннелированием.

Ключевые слова: HTTP-туннелирование, информационная безопасность, сетевой трафик, анализ пакетов, Scapy, обнаружение угроз, кибербезопасность, сетевой мониторинг, скрытые каналы передачи данных.

Среди широкого спектра угроз информационной безопасности (ИБ), таких как вирусы, фишинговые атаки и DDoS-атаки, особое место занимает проблема скрытного проникновения нарушителями ИБ в целевые ИТКС через HTTP-туннели. Техника создания и использования таких соединений позволяет скрыто передавать данные, обходя стандартные средства контроля и фильтрации сетевого трафика, что делает их популярным инструментом среди нарушителей ИБ для реализации кибератак. Более того, использование ими широко распространенных протоколов прикладного уровня, таких как HTTP (HyperText Transfer Protocol – протокол передачи гипертекста), представляет собой серьезную угрозу для безопасности корпоративных сетей, так как позволяет не только извлекать конфиденциальную информацию, но и осуществлять неконтролируемый доступ к ресурсам сети. Проблема усугубляется еще тем, что традиционные средства защиты, такие как сетевые экраны и антивирусные программы, часто оказываются неэффективными против этого типа атак из-за их скрытного характера и способности маскироваться под обычный трафик.

В свете этих обстоятельств, оперативное выявление HTTP-туннелей в информационном потоке корпоративной сети приобретает актуальность и необходимость. Цель данной статьи – разработка эффективного метода, позволяющего в реальном времени обнаруживать и блокировать попытки использования HTTP-туннелирования в сетевом трафике, что повысит общий уровень защиты ИТКС. Для достижения этой цели требуется комплексный анализ существующих методов обнаружения использования HTTP-туннелирования, определение их недостатков и разработка новых, более эффективных технологических решений. Это включает в себя применение перспективных алгоритмов машинного обучения, методов глубокого анализа потоков данных и разработку специализированного программного обеспечения, способного оперативно реагировать на угрозы, основанные на использовании технологии HTTP-туннелирования.

Обзор технологии и особенности использования HTTP-туннелирования. HTTP-туннелирование представляет собой многофункциональную технологию, позволяющую передавать данные через корпоративные сетевые порты 80 и 443, которые обычно остаются открытыми для веб-трафика.

Основной составляющей технологии HTTP-туннелирования является использование прокси-сервера, действующего в качестве посредника между клиентом и сервером. Клиент отправляет HTTP-запросы прокси-серверу, который, в свою очередь, преобразовывает эти запросы в нужный тип трафика и передает их на целевой сервер. Ответы от сервера принимаются прокси-сервером, преобразуются обратно в формат HTTP и пересылаются клиенту. Технология HTTP-туннелирования может использоваться для различных целей, включая обеспечение конфиденциальности передачи данных с помощью шифрования. Однако такая технология может быть использована нарушителями ИБ для маскировки вредоносного потока данных и значительно усложнить процесс анализа и фильтрации трафика сетевыми мониторинговыми инструментами. Это связано с тем, что HTTP-туннелирование представляет собой механизм, который позволяет инкапсулировать протоколы и типы трафика, которые обычно не используют HTTP, в допустимые HTTP-запросы и ответы. Это достигается за счет передачи данных, которые не являются частью стан-

дартного HTTP-трафика, через HTTP-сессии, что может оказаться полезным для обхода межсетевых экранов (firewall) или промежуточных серверов (proxy, прокси-сервер), реализующих политики фильтрации сетевого трафика.

Исходя из вышесказанного, использование HTTP-туннелирования порождает ряд проблем, значительно усложняющих процесс оперативного выявления применения данной технологии нарушителями ИБ в сетевом трафике ИТКС. Следует заметить, что одной из важных проблем является маскировка сетевого трафика. Так, используя стандартные HTTP-запросы и ответы для туннелирования, малозаметные данные могут без труда скрываться среди легитимного веб-трафика, что делает их обнаружение сложной задачей. Нарушители ИБ могут применять эти возможности для проникновения в сетевую инфраструктуру или передачи чувствительных данных [1].

Кроме того, функционирование HTTP-туннелирования может привести к увеличению нагрузки на сетевые ресурсы. Интенсивное использование туннелей для передачи больших объемов данных может вызвать замедление работы сети, тем самым уменьшая её эффективность и производительность. Выявление таких активностей требует отслеживания и анализа большого объема передаваемых данных, что, в свою очередь, может потребовать дополнительных ресурсов для транспортировки и обработки информации. Например, системы глубокого анализа пакетов (Deep Packet Inspection, DPI) могут быть неэффективны из-за шифрования данных внутри HTTP-сессий. На рис. 1 представлен процесс атаки на корпоративную сеть с обходом средств защиты, используя HTTP-туннелирование.

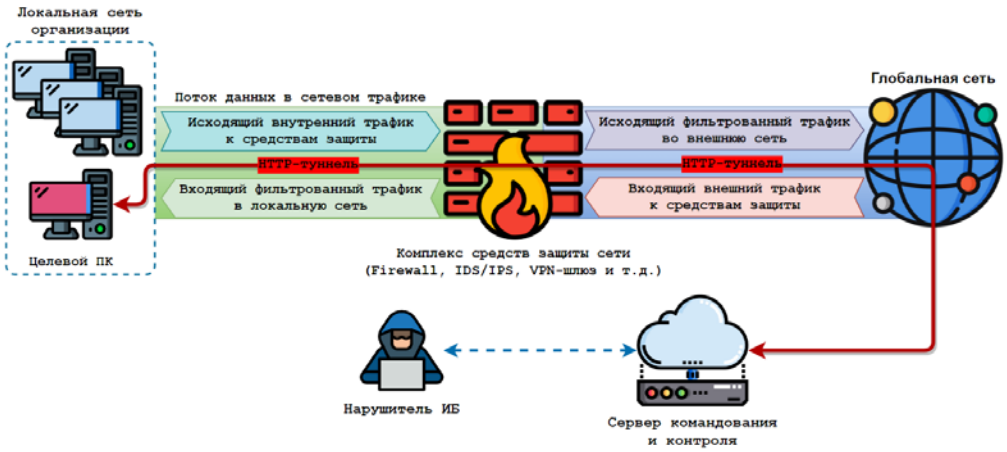


Рис. 1. Процесс атаки на корпоративную сеть с обходом средств защиты, используя HTTP-туннелирование

Безопасность является еще одной существенной проблемой при использовании HTTP-туннелирования. Хотя протокол HTTP и предполагает передачу данных по открытым каналам, наличие дополнительных слоев шифрования и обфускации в рамках туннелирования может усложнить процесс верификации и аутентификации пользователей и узлов. Таким образом, HTTP-туннелирование, несмотря на его полезность и удобство, представляет собой технологию, имеющую ряд значительных сложностей, которые необходимо учитывать при разработке методов оперативного обнаружения и нейтрализации воздействий, связанных с данным видом трафика в ИТКС.

В связи с этим, разработка метода оперативного выявления HTTP-туннелей в сетевом трафике становится необходимой и важной актуальной задачей. Это включает в себя создание эффективных алгоритмов и методов детектирования аномалий, способных распознавать нестандартные паттерны использования протокола HTTP.

Сравнительный анализ существующих методов обнаружения использования технологий HTTP-туннелирования. В рамках проведения сравнительного анализа рассмотрим основные существующие подходы и методы обнаружения использования технологий HTTP-туннелирования, их преимущества и недостатки по сравнению с предлагаемым методом оперативного выявления.

Одним из традиционных подходов является использование систем обнаружения вторжений (IDS), которые анализируют трафик на предмет аномалий или известных сигнатур атак. Эти системы, хотя и эффективны в некоторых случаях, часто не могут корректно идентифицировать HTTP-туннели, поскольку в них используются легитимные HTTP-запросы и ответы для передачи данных.

Таблица 1

Сравнительный анализ методов обнаружения использования HTTP-туннелирования

№ п/п	Метод	Преимущества	Недостатки
1	Системы обнаружения вторжений (IDS)	Способны выявлять известные сигнатуры атак. Широко распространены и интегрируются в существующие инфраструктуры.	Низкая эффективность выявления применения HTTP-туннелирования из-за использования легитимных запросов. Высокий уровень ложноположительных срабатываний
2	Глубокий анализ пакетов (DPI)	Детальный анализ содержимого трафика. Возможность выявления аномалий в поведении протоколов.	Высокие требования к вычислительным ресурсам. Возможное нарушение конфиденциальности данных пользователей
3	Методы машинного обучения	Адаптивность к новым типам атак. Возможность выявления скрытых закономерностей в трафике.	Сложность сбора и обработки большого объема обучающих данных. Чувствительность к изменениям в типах трафика

Другой подход связан с анализом глубины пакетов (DPI), который позволяет более детально изучать содержимое трафика. DPI может отличать HTTP-туннели от других видов трафика на основе анализа заголовков, временных характеристик и типичных паттернов поведения. Однако такие системы требовательны к ресурсам и могут нарушать конфиденциальность пользовательских данных.

Кроме того, применяются методы машинного обучения для классификации трафика, которые обучаются на больших объемах исторических данных для выявления потенциального использования туннелирования.

Недостатком таких подходов является сложность в сборе и обработке необходимого объема обучающих данных, а также возможные ошибки в работе обученной модели из-за изменения характеристик трафика или новых типов туннелирования.

В табл. 1 представлен сравнительный анализ основных существующих методов обнаружения использования HTTP-туннелирования с указанием их преимуществ и недостатков.

Следует отметить, что независимо от выбранного метода, комплексный подход, включающий не только технологические решения, но и постоянное обновление знаний об актуальных угрозах и инструментах, обеспечит наиболее эффективную защиту ИТКС от использования технологий HTTP-туннелирования нарушителями ИБ.

Практическая реализация технологии HTTP-туннелирования. В связи с тем, что в открытом доступе существует множество инструментов для создания HTTP-туннеля [2-4], проверка работоспособности каждого из них затруднительна и нецелесообразна. Кроме того, их функциональность может не соответствовать необходимым требованиям. Поэтому авторами было принято решение разработать собственный программный комплекс на языке программирования Python, реализующий технологию HTTP-туннелирования между клиентом и сервером, что позволит провести целенаправленное исследование и анализ сетевого трафика, а также обеспечить гибкость и адаптивность инструмента под конкретные задачи исследования.

Программный комплекс, разработанный на основе анализа современных систем мониторинга компьютерных сетей, состоит из двух взаимосвязанных программ: серверной и клиентской [5]. Несмотря на их раздельную реализацию, эти программы образуют целостную систему, предназначенную для сбора, передачи и централизованного хранения информации о состоянии множества компьютерных систем в режиме реального времени.

Серверная часть программы, реализованная в файле *server-http-tunneling.py*, представляет собой веб-приложение на базе фреймворка *Flask* и обеспечивает выполнение двух ключевых задач: регистрации клиентов и приема данных. Процесс регистрации клиентов осуществляется путем сохранения уникального идентификатора клиента и его IP-адреса в оперативной памяти сервера. Механизм приема данных реализован таким образом, что программа асинхронно обрабатывает входящие POST-запросы, содержащие информацию о состоянии клиентских систем в формате JSON.

Полученные данные сервер сохраняет в файловой системе, формируя для каждого клиента отдельный JSON-файл, который пополняется при каждом новом поступлении данных. Важной особенностью серверной части программы является ее многопоточность, что обеспечивает эффективную обработку параллельных запросов от множества клиентов. На рис. 2 показан процесс работы и вывод на экран серверной части программы.

```
 * Serving Flask app 'server-http-tunneling'
 * Debug mode: off
INFO:werkzeug:WARNING: This is a development server. Do not use it in a production deployment. Use a production WSGI server instead.
 * Running on all addresses (0.0.0.0)
 * Running on http://127.0.0.1:8080
 * Running on http://192.168.26.122:8080
INFO:werkzeug:Press CTRL+C to quit
```

Рис. 2. Процесс работы серверной части программы

Клиентская часть программы, представленная в файле *client-http-tunneling.py*, реализует функционал сбора системной информации и ее периодической передачи на сервер. Клиент инициирует свою работу процедурой регистрации на сервере, отправляя ему свой уникальный идентификатор. Затем в отдельном потоке запускается циклический процесс сбора и отправки данных. Сбор информации осуществляется посредством системных вызовов и использования библиотеки *psutil*, что позволяет получить широкий спектр данных о состоянии системы, включая загрузку CPU, использование памяти и дискового пространства, сетевую активность, список запущенных процессов и информацию о пользователях. Дополнительно клиент собирает данные о файловой системе и выполняет команду *uname* для получения расширенной информации об операционной системе. Собранные данные сохраняются в формате JSON и отправляются на сервер посредством HTTP POST-запроса с заданной периодичностью. На рис. 3 показан процесс работы и вывод на экран клиентской части программы.

```
└─ sudo python3 ./client-http-tunneling.py
[+] Клиент успешно зарегистрирован.
[!] Отправляем данные...
[!] Статус ответа сервера: 200
[+] Данные успешно отправлены.
```

Рис. 3. Процесс работы клиентской части программы

В результате взаимодействия программ клиентской и серверной частей формируется комплексная система сбора и передачи данных, способная осуществлять непрерывный сбор, передачу и хранение детализированной информации о состоянии множества клиентских систем. На рис. 4 показано уведомление от системы о том, что клиент успешно подключён к серверу и передал информацию, которая была записана в файл (рис. 5).

```
INFO:root:Клиент зарегистрирован: client1 с IP 217.      193
INFO:werkzeug:217.      .193 - - [16/Oct/2024 13:20:06] "POST /register HTTP/1.1" 200 -
INFO:root:Данные от client1 сохранены в файл client1_data.json
INFO:werkzeug:217.      .193 - - [16/Oct/2024 13:20:07] "POST /data/client1 HTTP/1.1" 200 -
```

Рис. 4 Уведомление о корректном подключении клиента к серверу

```
"timestamp": "2024-10-16 14:30:42",
"hostname": "ubuntuvm",
"system": "Linux",
"release": "6.8.0-40-generic",
"version": "#40~22.04.3-Ubuntu SMP PREEMPT_DYNAMIC Tue Jul 30 17:30:19 UTC 2",
"architecture": "x86_64",
"processor": "x86_64",
"cpu_usage_percent": 0.4,
"memory_info": {
    "total": 8278142976,
    "available": 3862859776,
    "percent": 53.3,
    "used": 4079595520,
    "free": 333164544,
    "active": 2787954688,
    "inactive": 3672940544,
    "buffers": 56225792,
    "cached": 3809157120,
    "shared": 22876160,
    "slab": 533729280
```


Рис. 5. JSON-файл, содержащий информацию о клиенте

Такая архитектура системы сбора и передачи данных обеспечивает их централизованное накопление, что потенциально может быть использовано нарушителем ИБ для проведения комплексного анализа уязвимостей целевых систем. Получив доступ к серверу или перехватив передаваемые данные, атакующий может выявить паттерны в работе системы, идентифицировать слабые места в безопасности и потенциальные векторы атак на клиентские машины. Более того, нарушитель ИБ может модифицировать клиентскую программу, расширив спектр собираемой информации, включив в него, например, сбор конфиденциальных данных, ключей шифрования или учетных данных пользователей [6]. Это позволит в дальнейшем не только скомпрометировать клиентские системы, но и получить доступ к целевой инфраструктуре, потенциально используя собранную информацию для проведения направленных атак, социальной инженерии или масштабного взлома сети.

На рис. 6 представлена схема взаимодействия клиента и сервера для сбора и хранения системной информации.

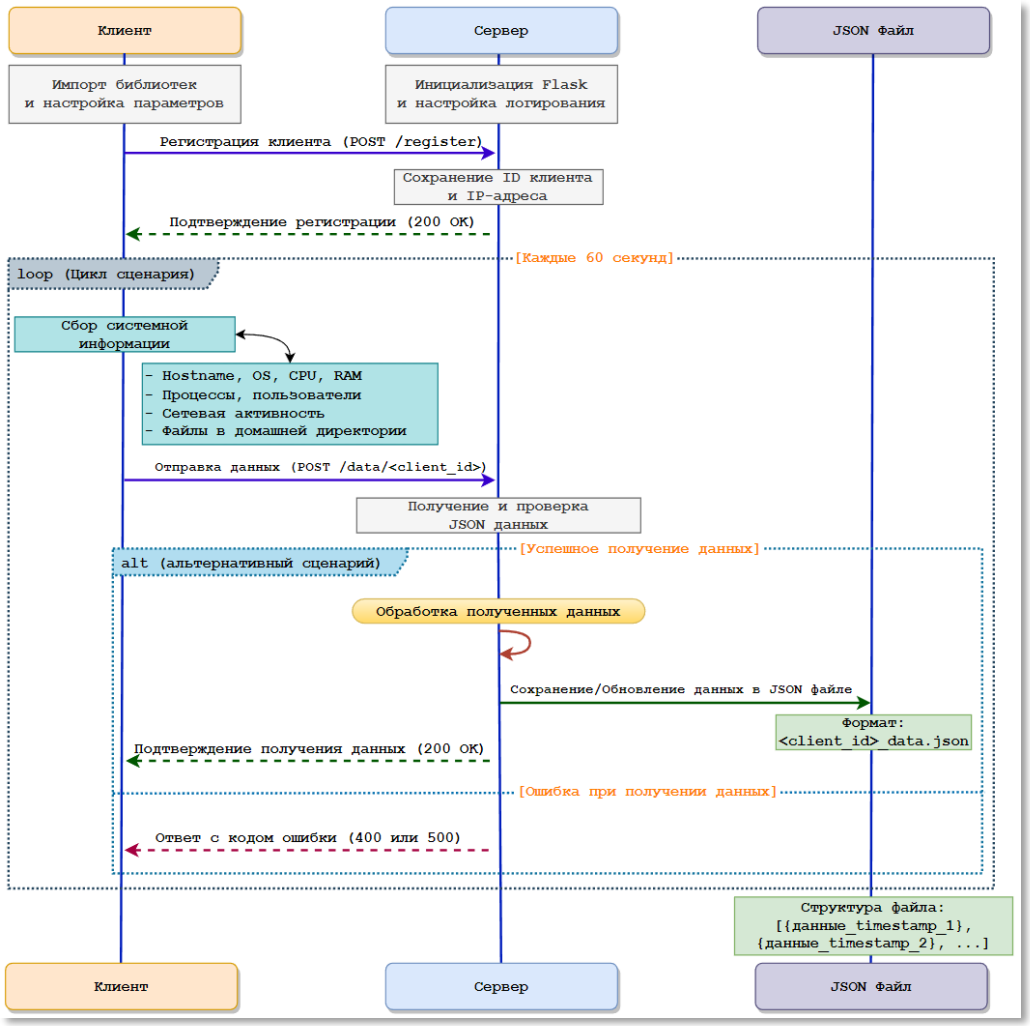


Рис. 6. Схема взаимодействия клиента и сервера для сбора и хранения системной информации

На приведенной схеме (рис.5) отображены следующие этапы взаимодействия Клиент-Сервер:

1. Клиент регистрируется на сервере.
2. Сервер подтверждает регистрацию клиента.
3. Взаимодействие Клиент-Сервер входит в цикл, который повторяется каждые 60 секунд:

– клиент собирает системную информацию;
– клиент отправляет собранные данные на сервер;
– сервер обрабатывает полученные данные;
– сервер сохраняет данные в JSON файл;
– сервер отправляет подтверждение клиенту о получении данных.

4. Конечным результатом взаимодействия клиента и сервера является собранный JSON-файл, названный в соответствии с ID клиента.

Использование HTTP-протокола для коммуникации между клиентом и сервером предоставляет нарушителю ИБ возможность легко маскировать вредоносный трафик под легитимный веб-трафик, что затрудняет его обнаружение стандартными средствами защиты. Периодичность отправки данных и асинхронность их обработки сервером позволяют атакующему осуществлять постепенное и незаметное извлечение конфиденциальной информации, минимизируя риск обнаружения. Данная реализация взаимодействия Клиент-Сервер представляет собой гибкую основу для создания масштабируемой системы удаленного доступа и контроля, которая может быть дополнена нарушителем ИБ функциями удаленного выполнения команд, кейлоггерами, средствами перехвата сетевого трафика и другими вредоносными модулями. Это позволит атакующему не только собирать чувствительные данные, но и осуществлять полный контроль над скомпрометированными системами, создавая обширную и трудно обнаруживаемую ботнет-сеть для дальнейших кибератак или кражи данных в промышленных масштабах.

Учитывая вышеизложенные угрозы и потенциальные риски, связанные с использованием HTTP-туннелирования для нелегитимных целей, становится очевидной необходимость разработки специализированного инструментария для оперативного обнаружения и анализа подозрительного HTTP-трафика.

Представление инструмента, реализующего метод выявления использования HTTP-туннелирования. Разработанный авторами инструмент [5] реализует единый метод обнаружения использования HTTP-туннелирования посредством анализа HTTP-трафика. Этот метод объединяет несколько взаимосвязанных функциональных компонентов, которые совместно обеспечивают эффективное выявление скрытой передачи данных и попыток обхода систем безопасности.

Инструмент осуществляет перехват сетевого трафика с помощью функции *sniff* из библиотеки Scapy [7], позволяя захватывать сетевые пакеты на заданном сетевом интерфейсе. Использование TCPSession при перехвате обеспечивает реконструкцию полных TCP-сессий, что предоставляет более глубокий уровень анализа взаимодействий между сетевыми узлами.

Каждый перехваченный сетевой пакет анализируется функцией *analyze_packet*, которая проверяет наличие слоя HTTPRequest, что позволяет сосредоточиться на HTTP-запросах, выделяя их из общего потока трафика. Инструмент ведет статистику по HTTP-пакетам, отслеживая общее количество обработанных запросов и распределение по методам, таким как GET и POST. Это способствует детальному пониманию характера трафика и выявлению аномалий в использовании различных методов HTTP.

Особое внимание уделяется POST-запросам на нестандартные порты, отличные от общепринятых 80 и 443. Такие запросы могут служить индикатором попыток обхода стандартных механизмов безопасности через HTTP-туннелирование. При обнаружении подобных POST-запросов инструмент пытается декодировать их содержимое и проверить наличие данных в формате JSON, который часто используется для структурированной передачи информации в туннелях.

Если выявляется содержащий полезную нагрузку POST-запрос на нестандартный порт и обнаруживается JSON-содержимое, инструмент регистрирует это событие как потенциальный HTTP-туннель. Кроме того, дополнительно, он отслеживает частоту таких запросов от каждого источника. Если количество запросов превышает установленный порог за определенный интервал времени (например, более пяти запросов в течение минуты), это классифицируется как подозрительная активность.

Все значимые события, включая обнаружение потенциальных туннелей и случаев повышенной активности, записываются в лог-файл *http_tunnel_detection.log*, что обеспечивает возможность последующего ретроспективного анализа и принятия мер по усилению безопасности сети.

Таким образом, представленный инструмент реализует комплексный метод глубокого анализа HTTP-трафика для обнаружения HTTP-туннелирования. Объединяя перехват, анализ содержимого запросов, мониторинг частоты и логирование событий, инструмент эффективно выявляет аномальные паттерны и способствует предотвращению скрытой передачи данных, а также обхода систем безопасности.

На рис. 7 представлена схема, отображающая следующую последовательность действий в функционале инструмента:

1. Sniffer-модуль перехвата сетевых пакетов, реализует функцию sniff, которая отвечает за отслеживание сетевого трафика. При перехвате сетевого пакета функция sniff вызывает функцию *analyze_packet* из модуля Analyzer для детального анализа каждого перехваченного сетевого пакета.

2. Analyzer-модуль анализа сетевых пакетов, содержит функцию *analyze_packet*, которая проводит детальную обработку и анализ каждого пакета, выполняя следующие действия:

а) проверка типа пакета, определяющая, является ли пакет HTTP-запросом;

б) обработка HTTP-запросов (если пакет является HTTP-запросом), включающая:

– обновление статистики (обновляет счетчики HTTP-пакетов для последующего анализа трафика);

– анализ нестандартных запросов (если метод запроса – POST и порт назначения не является стандартным для HTTP/HTTPS (не 80 и не 443)) с выполнением проверки содержимого (анализирует тело запроса на наличие JSON-данных) и обнаружением возможного использования туннелирования. При обнаружении JSON-данных в нестандартном POST-запросе: логирует сообщение о возможном использовании HTTP-туннелирования; обновляет счетчики подобных запросов; фиксирует время последнего запроса; если запросы от одного IP-адреса поступают с высокой частотой, то логирует предупреждение о подозрительной активности;

в) регулярное логирование статистики (каждые 100 пакетов функция логирует информационные сообщения о количестве обработанных пакетов и предоставляет статистику по используемым HTTP-методам).

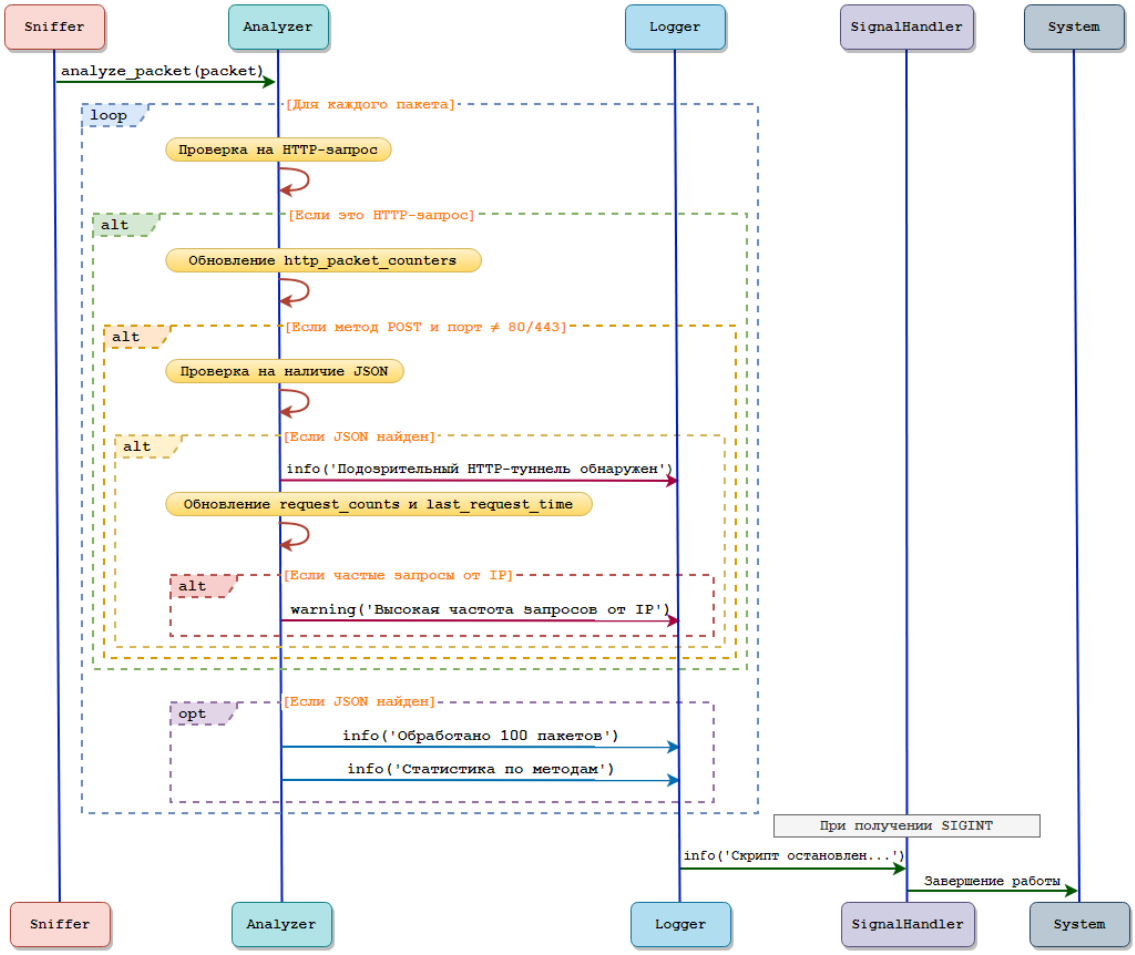


Рис. 7. Схема, отображающая последовательность действий инструмента анализа сетевого трафика

3. Logger-модуль логирования, выполняет запись результатов анализа и другой важной информации:
а) фиксация сообщений об обнаружении подозрительной активности;
б) сохранение статистических данных обработки;
в) логирование других важных событий в работе программы.

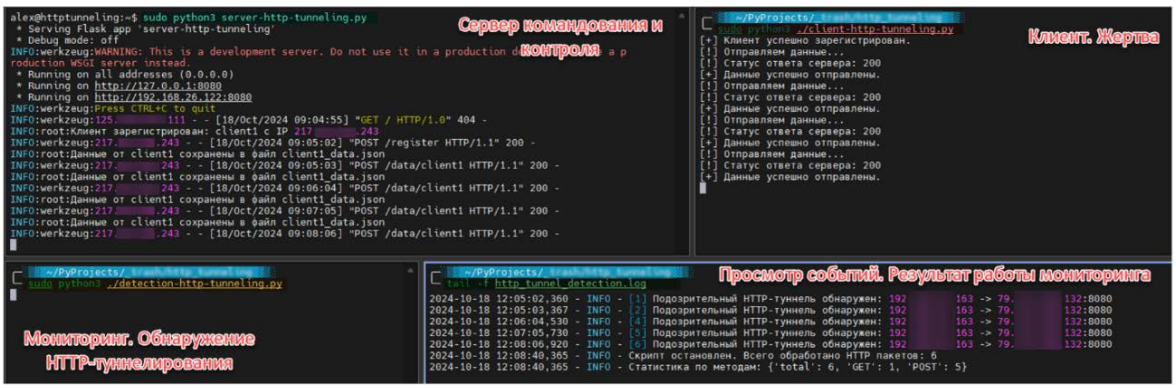


Рис. 8. Демонстрация взаимодействия между клиентом и сервером с мониторингом процессов

4. SignalHandler-модуль реализует функцию *signal_handler* для обработки системных сигналов:
а) обрабатывает сигнал SIGINT, генерируемый при нажатии пользователем сочетания клавиш Ctrl+C;
б) обеспечивает корректную остановку программы при получении соответствующего сигнала (позволяет безопасно завершить все процессы и сохраняет текущие данные перед завершением работы).
5. System-модуль, реализующий следующие функции:
а) обеспечение корректного завершения работы программы;
б) использование вызова *sys.exit(0)* для завершения;

в) освобождение всех ресурсов;

г) завершение работы всех модулей при остановке программы;

д) предотвращение возможных утечек памяти и других системных ошибок.

На рис. 8 продемонстрирован процесс взаимодействия между клиентом и сервером, а также показаны результаты работы представленного инструмента по мониторингу и выявлению скрытой передачи данных (использование HTTP-туннелирования).

Таким образом, разработанный авторами инструмент позволяет эффективно обнаруживать и анализировать попытки использования HTTP-туннелирования и является полезным средством для специалистов по информационной безопасности. Его внедрение может значительно повысить уровень защищенности сетевой инфраструктуры и содействовать предотвращению утечек данных, а также других многочисленных киберугроз, связанных с использованием скрытых каналов передачи информации.

Заключение. В процессе исследования подчеркнута важность увеличения эффективности обнаружения несанкционированного доступа и нелегитимной передачи данных через сетевые коммуникации. Авторами был разработан и успешно апробирован метод оперативного выявления технологии HTTP-туннелирования в сетевом трафике ИТКС. Результаты экспериментов показали, что разработанный на основе представленного метода инструмент анализа сетевого трафика обладает высокой чувствительностью и специфичностью, что делает его весьма перспективным для дальнейшего развития и интеграции в существующие системы обеспечения сетевой безопасности.

Однако, несмотря на достигнутые успехи, работа по совершенствованию подходов к детектированию HTTP-туннелей требует продолжения. Использование статистического анализа и алгоритмов машинного обучения способствует повышению точности выявления HTTP-туннелей, что доказывает важность применения современных технологических подходов в области информационной безопасности. Необходимо сосредоточить усилия на дальнейшем улучшении внедряемых методов и алгоритмов, а также повышении скорости обработки данных в реальном времени. Это особенно важно в контексте постоянно эволюционирующих киберугроз и увеличения объема сетевого трафика.

Список литературы

1. SecurityLab. Sensitive Information. [Электронный ресурс] URL: https://www.securitylab.ru/glossary/sensitive_information (дата обращения: 14.10.2024).

2. GitHub - anderspitman/awesome-tunneling: List of ngrok/Cloudflare Tunnel alternatives and other tunneling software and services. Focus on self-hosting. [Электронный ресурс] URL: https://github.com/anderspitman/awesome-tunneling (дата обращения: 15.10.2024).

3. 12 Best Ngrok Alternatives for Tunneling (Free & Paid). [Электронный ресурс] URL: https://www.regendus.com/best-ngrok-alternatives (дата обращения: 16.10.2024).

4. Top 10 Ngrok alternatives in 2024. [Электронный ресурс] URL: https://pinggy.io/blog/best_ngrok_alternatives (дата обращения: 16.10.2024).

5. GitLab. Alexander / HTTP Tunneling Detection System GitLab. [Электронный ресурс] URL: https://gitlab.uno/alex/http-tunneling-detection-system (дата обращения: 16.10.2024).

6. Степанюк О.М., Подшибякин А.С., Соловьева М.В. Особенности функционирования PAM-модулей в операционной системе Linux и обнаружение вредоносного программного обеспечения при использовании технологии eBPF // Технологии, алгоритмы и программы решения прикладных задач кибербезопасности, помехозащищенности и информационного обеспечения. Выпуск 6 (40). СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2023. С. 9-17.

7. Scapy. Manipulate packets. [Электронный ресурс] URL: https://scapy.net (дата обращения: 17.10.2024).

Степанюк Орест Михайлович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Подшибякин Александр Сергеевич, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A METHOD FOR THE RAPID DETECTION OF HTTP TUNNELING IN THE NETWORK TRAFFIC OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

O.M. Stepanyuk, A.S. Podshibyakin

This scientific article focuses on the development and implementation of a method for the operational identification of HTTP tunneling technology used in the network traffic of information and telecommunication systems. The study examines the characteristics of HTTP tunneling and conducts a comparative analysis of existing detection methods. A new approach based on the comprehensive analysis of network traffic is proposed, which can be used to detect suspicious activity and potential security threats. The practical implementation of the developed client-server software package for HTTP tunneling is presented, along with a proprietary tunneling detection tool based on the Scapy library. The results of the research demonstrate the effectiveness of this approach in identifying potential security risks associated with HTTP tunneling.

Key words: HTTP tunneling, information security, network traffic analysis, packet analysis, Scapy, threat detection, cybersecurity, network monitoring, hidden data transmission channels.

Stepanyuk Orest Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, senior research associate of the research laboratory, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, A.F. Mozhaisky Military Space Academy,

Podshibyakin Alexander Sergeevich, researcher at the research laboratory, Russia, St. Petersburg, A.F. Mozhaisky Military Space Academy

УДК 681.5.08, 62-97
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-224-225

ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Т.А. Акименко, Е.В. Филиппова

Рассматриваются вопросы контроля тепловизионных измерительных приборов. Показано, что потери информации могут быть связаны с дисторсией, виньетированием, боковыми помехами от деталей оптической системы, аберрациями оптической системы, эффектом Нарцисса, с неравномерностью статической тепло-сигнальной передаточной характеристики по площади приемника-преобразователя.

Ключевые слова: тепловизионный измерительный прибор, тепловое излучение, контроль, тепловой образ сцены, эталонный тестовый сигнал, тепловой тест-объект.

Тепловизионные измерительные приборы (тепловизоры) нашли широкое применение в различных сферах человеческой деятельности: для выявления и быстрого поиска объектов за пеленой дыма во время пожаротушения, применения в промышленности, строительстве, для технического обслуживания электрооборудования и контроля качества на производстве, используются на предприятиях энергетики, топливно-энергетического, химического и нефтегазового комплексов, коммунального хозяйства, в медицине, для определения температурных аномалий и поиска дефектов, связанных с повышением температуры, помогают находить утечки тепла в зданиях.

Для оценки качества работы тепловизионных измерительных приборов необходимо разработать систему тестирования и контроля данных приборов с учетом их структуры и параметров функционирования.

Функциональная схема тепловизионных измерительных приборов в общем случае состоит из сканирующей системы; инфракрасного детектора, объектива, инфракрасного датчика, аналого-цифрового преобразователя, контроллера ввода данных в ЭВМ, монитора тепловизора [6]. Тепловизионный измерительный прибор выполняет свою функцию преобразования теплового излучения, генерируемого наблюдаемой сценой, в тепловой образ. При этом на каждом этапе аппаратными средствами тепловизионным измерительным прибором вносятся искажения, что приводит к потерям информации, и в конечном итоге изменяет первичный тепловой образ сцены [1, 8, 11, 12. 14].

Первым уровнем потерь является оптико-механический уровень $f_o(y, z)$. Кроме требуемой фокусировки светового потока в плоскости расположения фотоэлектронного преобразователя происходит его искажение (аберрации оптической системы, дисторсия, виньетирование, боковые помехи от деталей оптической системы, эффект Нарцисса). Источниками аберраций являются: объектив (сферические и нелинейные аберрации), различного рода светофильтры, отражающие и преломляющие поверхности, среда распространения света.

Второй уровень потерь представляется приемником-преобразователем оптического сигнала $f_д(Y, Z)$, при провождении через который наряду с погрешностями, связанными с конечными размерами дискретизирующих элементов и наличием кружка Эри объектива, возникают погрешности, связанные с неравномерностью статической тепло-сигнальной передаточной характеристики по площади приемника-преобразователя.

При механическом сканировании в непрерывном, а не старт-стопном режиме возникают потери, в виде «смаза» изображения за счет динамики протекающих механических процессов. Ухудшение пространственно-частотных характеристик сигнала возникают по той координате, по которой осуществляется механическое сканирование.

Аналого-цифровой преобразователь вносит шум преобразования, определяемый нелинейной характеристикой $D_{jk}(U_{jk})$. Возникают потери, связанные с настройкой нижнего и верхнего порогов преобразования.

В системе отображения – потери в разрешающей способности экрана при формировании изображения по горизонтали и вертикали, недостаточное разрешение дисплея, дисторсия изображения, ограничение контраста.

В соответствии с принципом контроля:

1) формируется эталонный тестовый сигнал $S_Т(Y, Z, \lambda)$, тестовым сигналом может служить тепловой тест-объект, представляющий собой теплоизлучающий объект с заданными пространственной частотой или формой, температурным контрастом на равномерно излучающем фоне с известным значением его температуры и излучательными способностями фона и объекта:

2) эталонный тестовый сигнал $S_Т(Y, Z, \lambda)$ подается на входы реальной и эталонной систем, которые в результате функциональных преобразований $f_Р(S_Т)$ и $f_Э(S_Т)$ формируют сигналы $S_Р$ и $S_Э$, соответственно;

3) определяется ошибка в виде нормы разности сходных характеристик сигналов на выходах реальной и эталонной систем

$$\varepsilon = \|\boldsymbol{h}(S_Э) - \boldsymbol{h}(S_Р)\|, \quad (1)$$

где $\boldsymbol{h}(S_Э)$ и $\boldsymbol{h}(S_Р)$ - K-мерный вектор характеристик сигнала, вычисляемый как его векторная функция;

4) величина ошибки сравнивается с порогом $\varepsilon_П$, и в случае, если $\varepsilon \le \varepsilon_П$, то картина эталонного тестового сигнала признается годной для дальнейшего использования, а тепловизионный измерительный прибор признается настроенным правильно;

5) в случае, если $\varepsilon > \varepsilon_П$, то картина эталонного тестового сигнала признается негодной для дальнейшего использования, тепловизионный измерительный прибор подлежит настройке.

К норме (1) применяются следующие требования:

1) функция $\|\boldsymbol{h}(S_Э) - \boldsymbol{h}(S_Р)\|$ должна быть неотрицательной, т.е. $\|\boldsymbol{h}(S_Э) - \boldsymbol{h}(S_Р)\| \ge 0$;

2) функция $\|\boldsymbol{h}(S_Э) - \boldsymbol{h}(S_Р)\| = 0$, тогда и только тогда, когда $S_Э = S_Р$;

3) функция является симметричной, т.е. $\|\boldsymbol{h}(S_Э) - \boldsymbol{h}(S_Р)\| = \|\boldsymbol{h}(S_Р) - \boldsymbol{\chi}(S_Э)\|$;

4) для функции $\|\boldsymbol{h}(S_Э) - \boldsymbol{h}(S_Р)\|$ выполняется свойство $\|\boldsymbol{h}(S_Э) - \boldsymbol{h}(S_Р)\| \le \|\boldsymbol{h}(S_Э) - \boldsymbol{h}(S_0)\| + \|\boldsymbol{h}(S_0) - \boldsymbol{h}(S_Р)\|$, где S_0 - некоторый сигнал.

Для вычисления ошибки можно использовать сумму квадратов расстояний

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^{K} \left[h_k(S_Э) - h_k(S_Р)\right]^2 ; \quad (2)$$

где $h_k(S_Э)$ - k-я составляющая вектора характеристик эталонного сигнала, $1 \le k \le K$; где $h_k(S_Р)$ - k-я составляющая вектора характеристик реального сигнала, $1 \le k \le K$.

В том случае, если характеристики имеют разный вес в оценке близости функционирования реального и эталонного тепловизионного измерительного прибора, то норма может быть вычислена по зависимости:

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^{K} c_k \cdot \left[h_k(S_Э) - h_k(S_Р)\right]^2 ; \quad (3)$$

где $0 \le c_k \le 1$ - «вес» k-й характеристики сигнала в общей оценке;

$$\sum_{k=1}^{K} c_k = 1 . \quad (4)$$

Зависимости (2) и (3) выбраны в качестве наиболее приемлемых, поскольку являются гладкими дифференцируемыми функциями и не содержат вычисления квадратного корня.

Система, проводящая преобразование $f_Э(S_Т)$, может быть реальной физической системой, например, эталонный тепловизионный измерительный прибор из заданного класса, или она может быть реализована в виде виртуальной системы на ЭВМ, в которую вводится виртуальный тест-объект.

Работа выполнена в рамках гранта ДС/99/ПАиР/23/ТО.

Список литературы

1. Акименко Т.А., Филиппова Е.В. Исследование статических характеристик и пространственной динамики тепловизионной системы наблюдения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 497-500.

2. Akimenko T.A. Formation of the image on the receiver of thermal radiation. В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2018. С. 1069627.

3. Akimenko T., Filippova E. Computer Modeling of Control the Thermal Imaging System Surveillance. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) Volume 11386 LNCS, 2019. P. 129-136. 7-th International Conference on Finite Difference Methods, FDM 2018; Lozenetz; Bulgaria; ISSN: 03029743. ISBN: 978-303011538-8. DOI: 10.1007/978-3-030-11539-5_12.

4. Криксунов Л.З., Усольцев И.Ф. Инфракрасные системы обнаружения, пеленгации и автоматического сопровождения движущихся объектов. М.: Советское Радио, 1968. 320 с.

5. Павлов А.В., Черников А.И. Приемники излучения автоматических оптико-электронных приборов. М.: Энергия, 1972. 240 с.

6. Филиппова Е.В., Акименко Т.А. Приемники излучения тепловизионных приборов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 2. С. 203-207.

7. Филиппова Е.В. Общая структура тепловизоров и варианты их классификаций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 11-2. С. 348-351.

8. Филиппова Е.В., Акименко Т.А., Горбунова О.Ю. Информативность и потери информации в тепловизионных системах наблюдения // В сборнике: Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта. Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции. Екатеринбург, 2024. С. 292-295.

9. Филиппова Е.В., Филиппов А.Е. Системы тепловидения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 4. С. 151-154.

10. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В. М., Солдатов Ю. И. Основы тепловидения. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 122 с.

11. Акименко Т.А., Филиппова Е.В. Особенности тестирования систем наблюдения // В сборнике: 59-я Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием. Сборник докладов конференции. В 2-х частях. Под редакцией М.С. Воротилина. Тула, 2023. С. 294-298.

12. Акименко Т.А., Филиппова Е.В., Кобышева Е.А. Тестирование объектов тепловизионной системой наблюдения// В сборнике: Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта. Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции. Екатеринбург, 2023. С. 234-237

13. Патент на полезную модель № 176316 РФ. Тест-объект для измерения разрешения тепловизоров / Т.А. Акименко, Е.В. Ларкин, Е.В. Филиппова. Опубл. 16.01.2018.

14. Ларкин Е.В., Титов Д.В., Акименко Т.А., Ширабакина Т.А. Тестирование ИК-сенсоров с использованием генератора эталонных тестовых сигналов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 3. С. 210−222.

15. Испытательные таблицы для измерения качества цифрового и аналогового телевизионного вещания // «625». 1999. №8. С. 36−42.

16. Акименко Т.А., Филиппова Е.В. Структура тепловизионной системы наблюдения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 12. С. 585-587.

17. Патент на полезную модель RU 228697 U1. Генератор тепловых сцен / Акименко Т.А., Филиппов А.Е., Ларкин Е.В., Филиппова Е.В., Кузнецова Т.Р. Опубл. 09.09.2024. Заявка от 17.06.2024.

Акименко Татьяна Алексеевна, канд. техн. наук, доцент, tantan72@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Филиппова Екатерина Вячеславовна, канд. техн. наук, доцент, kisskin@bk.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого

PROBLEMS OF CONTROL OF THERMAL IMAGING MEASURING INSTRUMENTS

T.A. Akimenko, E.V. Filippova

The article considers the issues of control of thermal imaging measuring devices. It is shown that information losses can be associated with distortion, vignetting, lateral interference from optical system parts, optical system aberrations, the Narcissus effect, and with non-uniformity of the static thermal-signal transfer characteristic over the area of the receiver-converter.

Key words: thermal imaging measuring device, thermal radiation, control, thermal image of the scene, reference test signal, thermal test object.

Akimenko Tatiana Alekseevna, candidate of technical sciences, docent, tantan72@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Filippova Ekaterina Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, docent, kisskin@bk.ru, Russia, Tula, Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy

УДК 352/354-1
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-226-227

ПОРЯДОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ «МЕСТ» ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ УРОВНЯМИ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

И.А. Кочанов, Ю.Л. Плеханов, А.В. Смирнов

В статье рассматривается порядок определения «мест» поддержки принятия решений с учетом взаимодействия между уровнями управления организационно-технической системы.

Ключевые слова: уровни управления, организационно-техническая система, принятия решения, информация.

Управление организационно-техническими системами (ОТС) это сложный многогранный процесс, с большим количеством операций, высокими скоростями развития текущих ситуации и частой сменой событий. В следствии чего, возникающие проблемы и задачи управления, при помощью формальных, основанных на точном описании проблемных ситуаций, анализе и выработке механизма управления математических методов не решить, так как они характеризуются большим числом влияющих факторов, неопределенностью, нечеткостью данных об объекте управления, размытостью и быстрым изменением целей. Внешняя среда все более становится нестабильной и неопределенной. Нестабильность проявляется в том, что темпы изменения внешней среды растут, а неопределенность – в том, что возникающие ситуации все чаще становятся совершенно новыми. Информация для принятия управленческих решений часто не доступна или ее получение затруднительно, а работа субъекта управления в такой обстановке осложнена тем, что для принятия решения необходимо проанализировать и сложить в единую картину большое количество разнородной информации об объекте управления.

Структура организации обуславливает и основные особенности управляющий процессов, протекающих при функционировании и развитии сложных организационно-технических систем [1– 7] это:

иерархичность процессов управления в соответствии с иерархической структурой системы управления;

циклический характер, в том числе, на каждом уровне иерархии системы управления;

интенсивность и сложность (наличием обратных и «перекрестных» связей) восходящих и нисходящих информационных потоков между уровнями иерархии системы управления.

Учитывая все выше сказанное в обобщённой структуре процесса управления в сложных организационно-технических системах (рисунок 1) можно выделить два основных направления:

перспективное планирование и управление (этапы прогнозирование развития, перспективное (стратегическое) планирование развития);

оперативное управление функционированием (этапы текущее планирование, оперативное управление и регулирование, учет, контроль, и анализ деятельности).

В начале реализации функций первого направления необходима обобщенная информация об объектах и протекающих процессах в течение некоторого интервала планирования.

Реализация функций оперативного управления базируется на текущей информации о состоянии конкретных управляемых объектов и процессов.

Общую основу для реализации функций первого и второго направлений составляют сведения, характеризующие объекты управления со всеми их характеристиками и особенностями.



Рис. 1. Обобщенная структура процесса управления в ОТС

На каждом этапе управления реализация управленческой деятельности состоит из следующих фаз:

сбор информации от источников о существенных для управления параметрах состояния системы и среды;

централизация, концентрация и агрегирование информации;

смысловая, аналитическая обработка информации, представление информации в виде, пригодном для принятия решения;

принятие решения;

доведение и контроль исполнения принятых решений;

оценка качества принятых решений и эффективности их реализации.

Центральной фазой всех этапов управленческой деятельности является принятие решения. Эффективность реализации задач принятия решений в значительной степени определяет эффективность управления в ОТС.

На эффективность управления организационно-техническими системами существенное влияние оказывает качество информационного взаимодействия при выработке и принятии решений, характеризующееся, прежде всего, адекватностью, с одной стороны, реализуемой модели информационного взаимодействия как внутри, так и между уровнями управления, с другой стороны, логикой процессов выработки и принятия решений при управлении организационно-техническими системами [8].

На рисунке 2 представлен порядок работы руководителя при выработке и принятии решений с учетом взаимодействия между уровнями управления организационно-технической системы и определения «мест» поддержки принятия решений.

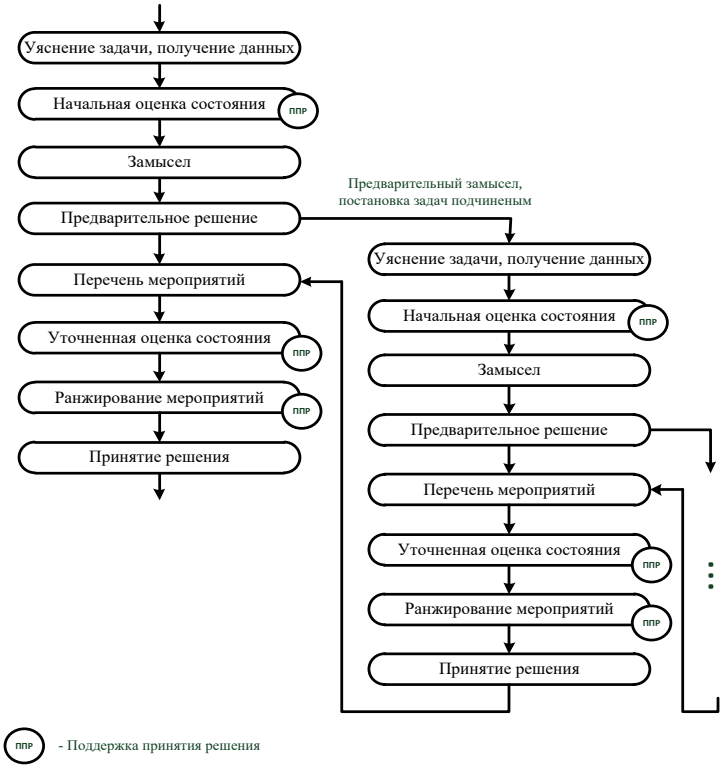


Рис. 2. Порядок работы руководителя при выработке решения с учетом взаимодействия между уровнями управления

В соответствии с этой схемой и с учетом взаимодействия между уровнями управления организационно-технической системы, порядок выработки решения может быть уточнен следующим образом. После этапов уяснения задачи, получения информации и начальной оценки состояния, руководитель формирует предварительный замысел, а также перечень предварительных решений. Замысел предполагает задание постановки задачи подчиненным, организацию их взаимодействия и обеспечения. По результатам работы подчиненных, руководитель уточняет оценку состояния системы, формирует окончательный перечень управляющих решений (мероприятий), выполняет ранжирование этих мероприятий и осуществляет принятие окончательного управляющего решения.

Следует отметить, что поддержка принятия решений возможна на этапах:

во-первых, начальной оценки состояния системы;

во-вторых, уточненной оценки состояния системы;

в-третьих, ранжирования управляющих решений.

При этом на этапах начальной и уточненной оценки состояния системы решаются задачи поддержки принятия решений уровней представления информации о системе и оценки состояния объектов (подсистем, системы в целом). А на этапе ранжирования управляющих решений выполняются задачи поддержки принятия решений уровня выбора (выработки управляющих решений).

Рассмотрим схему информационного обмена при выработке решений в процессе управления организационно-техническими системами с учетом взаимодействия как внутри, так и между уровнями управления.

На каждом уровне управления в зависимости от задач и распределения ответственности от принятия управляющих решений среди принимающих решений условно можно выделить руководителя и специалистов.

Руководитель взаимодействует со специалистами на своем уровне управления, а также с руководителями смежных (вышестоящим и нижестоящим) уровней управления. При этом руководитель формирует:

распоряжения и приказы для специалистов своего уровня управления;

распоряжения, приказы и директивы для руководителя нижестоящего уровня;

доклады и предложения для руководителя вышестоящего уровня.

Специалисты взаимодействуют с руководителем на своем уровне управления, а также со специалистами смежных (вышестоящим и нижестоящим) уровней управления. При этом специалисты формируют:

доклады и предложения для руководителя своего уровня управления;

согласования для специалистов нижестоящего уровня;

предложения и заявки для специалистов вышестоящего уровня.

Анализ порядка работы лиц принимающих решения, а также особенностей информационного обмена при выработке решений в процессе управления сложными организационно-техническими системами с учетом взаимодействия как внутри, так и между уровнями управления позволяет сделать вывод, что поддержка принятия решений выполняются специалистами:

при формировании предложений для руководителя своего уровня управления;

при формировании предложений для специалистов вышестоящего уровня.

Список литературы

1. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. М.: Радио и связь, 1990.

2. Урманцев Ю.А. Общая теория систем: состояние, приложение и перспективы развития. Система, симметрия, гармония. М.: Мысль, 1988.

3. Егоров Ю.Л. Исследование систем управления. М.: Наука, 1997.

4. Никитов В.А., Орлов Е.И., Старовойтов А.В., Савин Г.И. Информационное обеспечение государственного управления; под ред. Ю.В. Гуляева. М.: Славянский диалог. 2000.

5. Гопаненко А.Л., Полянский В.Г. Развитие региона, цели, закономерности, методы управления. М.: Изд. РАГС, 1999.

6. Катулев А.Н., Северцев Н.А. Исследование операций: принципы принятия решений и обеспечение безопасности. М.: Наука, 2000.

7. Основы современного социального управления. Учебное пособие. Под ред. В. Н. Иванова. М.: Энциклопедия управленческих знаний, 2000.

8. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. М.: Финансы и статистика, 2002.

Кочанов Игорь Анатольевич канд. техн. наук, доцент, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им.А.Ф.Можайского,

Плеханов Юрий Леонидович, канд. воен. наук, старший преподаватель, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия м.А.Ф.Можайского,

Смирнов Алексей Вадимович, канд. воен. наук, преподаватель, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им.А.Ф.Можайского

THE PROCEDURE FOR DETERMININQ «PLACES» OF DECISION SUPPORT, TAKING INTO ACCOUNT THE INTERACTION BETWEEN THE MANAGEMENT LEVELS OF THE ORQANIZATIONAL AND TEHNICAL SYSTEM

I.A. Kochanov, U.L. Plekhanov, A.V. Smirnov

The article discusses procedure for determining «places» of decision support, taking into account the interaction between the management levels of the organizational and technical systems.

Key words: management levels, organizational and technical systems, making a decision, information.

Kochanov Igor Anatolyevich, candidate of technical sciences, docent, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Plekhanov Yuri Leonidovich, candidate of militaring sciences, senior lecturer, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Smirnov Alexey Vadimovich, candidate of militaring sciences, senior lecturer, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 004.932.72
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-229-230

ПРИМЕНЕНИЕ МЕДИАННОГО И АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ

А.Ф.Кулакова

Рассмотрено применение медианного фильтра для устранения точечного шума ("соль и перец") и Гауссова шума и его совместное использование с адаптивным фильтром для подавления шумов на изображениях. Предложенный подход обеспечивает сохранение деталей изображения и границ объектов, что делает его эффективным для анализа спутниковых данных в задачах мониторинга инфраструктуры, экологических изменений и сельскохозяйственного планирования. Приводятся примеры обработки изображений, демонстрирующие улучшение качества снимков, а также обсуждаются преимущества, ограничения и возможности настройки фильтров для повышения точности.

Ключевые слова:спутниковые снимки, шумоподавление, медианный фильтр, адаптивный фильтр, гауссов шум, соль и перец, обработка изображений, мониторинг инфраструктуры, улучшение качества изображения, анализ данных дистанционного зондирования.

Обработка спутниковых снимков является важной частью дистанционного зондирования Земли и играет ключевую роль в мониторинге окружающей среды, сельском хозяйстве, геологии, экологии и других областях [1]. Качество спутниковых изображений, однако, может быть значительно ухудшено из-за различных видов шума, который появляется в процессе получения и передачи данных [2]. Эти шумы могут искажать информацию, ухудшая точность анализа и выводов, сделанных на основе данных. В частности, шумы, такие как «соль и перец», «Гауссов шум» и «смешанные шумы», часто присутствуют в спутниковых снимках и могут сильно влиять на результаты.

Цель данного исследования заключается в разработке и применении комбинированного подхода, включающего как медианный фильтр, так и адаптивный фильтр, для улучшения качества спутниковых снимков. Это позволит эффективно устранять как точечные, так и более сложные шумы, что сделает анализ спутниковых данных более точным и надежным.

Решение задачи шумоподавления и улучшения качества спутниковых снимков с помощью медианного фильтра и адаптивной фильтрации позволит повысить точность анализа данных в различных областях, таких как экология, сельское хозяйство, геология, урбанистика и другие.

Для оценки предложенного метода использовались спутниковые снимки различных регионов, предоставленные через открытые базы данных, такие как **Sentinel-2** и **Landsat-8**. Эти снимки представляют собой многоспектральные изображения, полученные с использованием различных сенсоров, и могут содержать различные типы шума. Гистограмма шума спутникового снимка представлена на рис. 1.

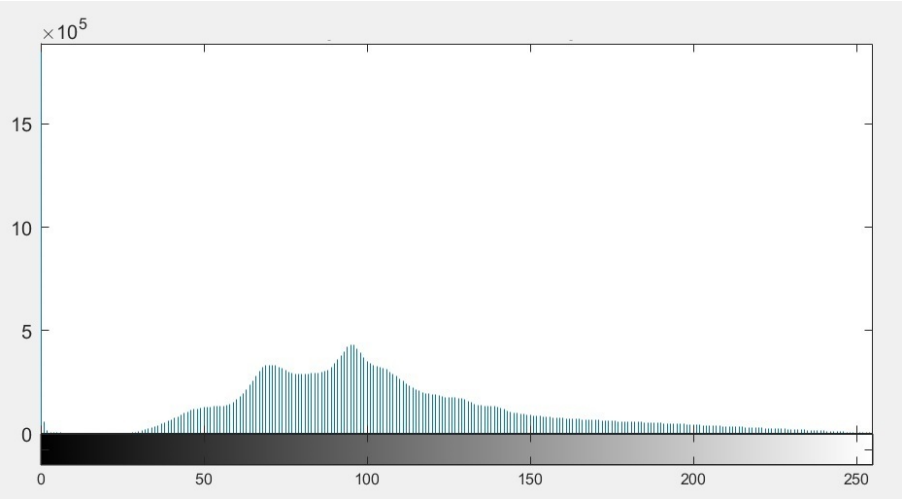


Рис. 1. Гистограмма шума для спутникового снимка

Для эксперимента использовались как изображения с явным шумом (например, с добавленным искусственным шумом), так и изображения, полученные в условиях плохих атмосферных условий, что создает дополнительные трудности для распознавания объектов.

Пример спутникового снимка с добавленными Гауссовым шумом и шумом «Соль и перец» представлена на рис. 2.

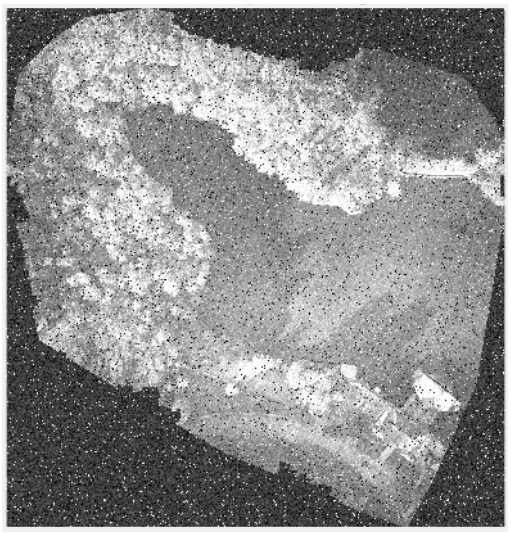


Рис. 2. Зашумленное изображение

Медианный фильтр. Медианный фильтр является простым, но мощным инструментом для устранения точечных шумов, таких как соль и перец, что делает его идеальным для предварительной обработки спутниковых снимков [3].

Медианный фильтр заменяет значение пикселя *I(x,y)* изображения на медиану значений пикселей в его окрестности *W(x,y)*, обычно в окне размером k×k. Окружение каждого пикселя состоит из пикселей, расположенных вокруг него, и медианой будет центральное значение отсортированного набора этих пикселей. Математически, для каждого пикселя *I(x,y)*, выходное значение *I′(x,y)* вычисляется по формуле (1) как медиана значений пикселей в окне *W(x,y)*:

$$I'(x,y) = median(\{I(i,j) \mid I(i.j) \in W(x,y)\}), \quad (1)$$

где *median* — это операция нахождения медианы отсортированного набора значений.

В отличие от линейных фильтров, медианный фильтр не усредняет значения, что позволяет эффективно устранять шумы, не размывая детали изображения [4].

Результаты медианного фильтра:

- До применения медианного фильтра: На изображениях присутствовали яркие белые и черные точки, что ухудшало восприятие деталей, особенно в областях с текстурами (например, лесные массивы или сельскохозяйственные зоны).

На первом этапе обработки спутниковых снимков был применен медианный фильтр для устранения точечного шума, характерного для спутниковых изображений, такого как «соль и перец». Для каждого изображения использовались окна размером 3x3 и 5x5.

- После применения медианного фильтра: Изображения стали заметно чище. Точечный шум был эффективно удален, но на рис. 3 можно заметить размытость мелких объектов или линий, например, на границах рек или дорог.

Ограничение размытости медианного фильтра связано с его слабой способностью сохранять текстуры на высоких уровнях детализации

Адаптивный фильтр. Адаптивные фильтры корректируют свою работу в зависимости от локальных характеристик изображения, таких как среднее значение и стандартное отклонение интенсивности пикселей в окне [5]. Это позволяет адаптировать степень фильтрации в зависимости от того, где на изображении требуется более сильное подавление шума и где важно сохранить детали [6].

В качестве адаптивного фильтра был выбран фильтр Винера [7]. Этот фильтр минимизирует среднеквадратичную ошибку между оригинальным и зашумленным изображением, используя информацию о локальных статистиках изображения [8].

Формула минимизации MSE для фильтра Винера выглядит следующим образом:

$$J(h) - \mathrm{E}\left[\left(f(x,y) - g(x,y)\right)^2\right] = \mathrm{E}\left[\left(f(x,y) - \sum_{i,j} h(i,j) f(x-i, y-j)\right)^2\right], \quad (2)$$

где *J(h)* – среднеквадратичная ошибка, *f(x,y)* – исходное изображение; *g(x,y)* – восстановленное изображение; h(x,y) – коэффициенты фильтра;

Задача минимизации сводится к нахождению такого фильтра *h(x,y)*, который минимизирует среднеквадратичную ошибку *J(h).*

После предварительного удаления точечного шума с помощью медианного фильтра был применен адаптивный фильтр Винера, который направлен на устранение Гауссового шума и других плавных шумов.

Результаты фильтра Винера:

- До применения адаптивного фильтра: Изображения все еще содержали остаточные шумы в виде плавных колебаний интенсивности, особенно в областях с низкой текстурой, например, на водоемах или в однородных сельскохозяйственных угодьях.

- После применения фильтра Винера: Шум был значительно снижен, а текстуры и детали изображения на рис. 4, такие как контуры объектов, стали более четкими. В отличие от медианного фильтра, фильтр Винера не приводил к размытию границ объектов и сохранению контуров.

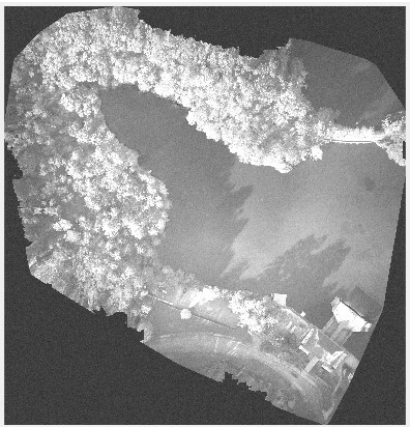


Рис. 3. Изображение после применения медианного фильтра

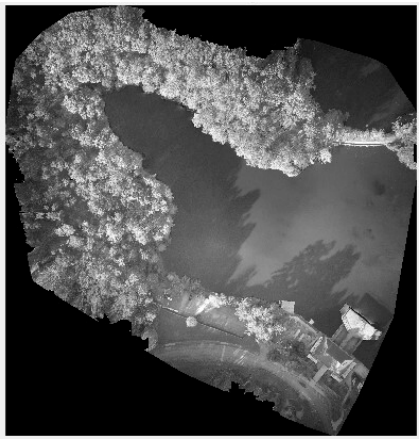


Рис.4. Снимок после применения медианного и фильтра Винера

Алгоритм совместного применения медианного и адаптивного фильтров. Процесс обработки спутниковых снимков заключается в последовательном применении двух фильтров:

1. Медианный фильтр применяется первым для устранения точечного шума (например, соляного и перцового шума).
2. Затем, после первичной фильтрации, применяется адаптивный фильтр Винера для устранения Гауссового шума и других плавных шумов, сохраняя важные детали изображения.

Этот подход позволяет комбинировать лучшие качества обоих методов: медианный фильтр эффективно устраняет точечный шум, а адаптивный фильтр корректирует и улучшает изображение в областях с Гауссовым или другими типами шумов.

После применения двух фильтров последовательно (сначала медианный фильтр, затем фильтр Винера) результаты улучшения качества изображения стали еще более значимыми. Этот комбинированный подход позволил эффективно устранить как точечный, так и плавный шум, обеспечив высокое качество восстановления изображения.

Результаты комбинированного подхода:

- До применения комбинированного подхода: Изображение было сильно зашумлено, что затрудняло точную интерпретацию объектов, таких как дороги, здания и водоемы.

- После применения комбинированного подхода, код которого представлен на рис.5: Изображение стало значительно чище, при этом границы объектов были сохранены. Особенно улучшилось качество в областях с низким контрастом, где раньше шум покрывал важные элементы изображения. Детали, такие как линии дорог, текстуры сельскохозяйственных полей и другие объекты, стали более четкими и легко различимыми.

Несмотря на высокую эффективность предложенного подхода, были выявлены некоторые ограничения:

- Применение двух фильтров последовательно увеличивает время обработки, что может быть критично для работы с большими объемами данных (например, при обработке тысяч спутниковых снимков).

- В некоторых случаях, особенно в областях с высокой текстурной детализацией, комбинированный фильтр может слегка размывать мелкие детали.

- Комбинированный метод требует больше вычислительных ресурсов по сравнению с использованием только одного фильтра. Это может стать ограничением при обработке больших объемов спутниковых данных.

```
# Применение медианного фильтра
median_filtered = median_filter(salt_pepper_noise, size=3)

# Применение фильтра Винера
wiener_filtered = None
try:
    wiener_filtered = wiener(median_filtered, mysize=(5, 5))
except Exception as e:
    print("Ошибка при фильтрации Винера:", e)
```

Рис. 5. Пример кода для реализации фильтров

Пути устранения ограничений:

1. Оптимизация алгоритмов фильтрации для ускорения обработки (например, использование параллельных вычислений или оптимизация кода).

2. Разработка адаптивных методов, которые бы автоматически выбирали параметры фильтрации в зависимости от характеристик изображений, таких как текстура и уровень шума.

Для оценки эффективности предложенного подхода использовались метрики, приведенные в таблице.

Метрики качества восстановления изображения

Метод фильтрации	PSNR	SSIM	Время
Медианный фильтр	28.5	0.85	0.2с
Фильтр Винера	32.1	0.92	0.5с
Комбинированный метод	35.3	0.95	0.7с

PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio): измеряет качество восстановления изображения относительно исходного [9]. Высокие значения PSNR указывают на лучшее качество восстановления.

SSIM (Structural Similarity Index): измеряет сходство структуры между оригинальным и восстановленным изображением [10]. Более высокие значения SSIM свидетельствуют о более высоком качестве сохранения структуры изображения

Заключение. В этом разделе были описаны материалы, используемые для оценки метода совместного применения медианного и адаптивного фильтров для обработки спутниковых снимков, а также методы и алгоритмы, которые обеспечивают эффективное подавление шума и сохранение важных деталей изображения [11]. Выбор медианного фильтра для устранения точечного шума и адаптивного фильтра Винера для борьбы с более сложными шумами позволяет эффективно улучшать качество спутниковых снимков, что имеет важное значение для анализа и мониторинга Земли.

Для сравнения были использованы традиционные методы фильтрации, такие как средний фильтр и Гауссов фильтр.

- Средний фильтр и Гауссов фильтр дали хорошие результаты в плане устранения плавного шума, но при этом наблюдалась значительная потеря деталей и размытость объектов, особенно на краях.

- Медианный фильтр и адаптивный фильтр Винера в комбинации обеспечили наилучший баланс между удалением шума и сохранением важной информации об объектах и текстурах.

Предложенный метод имеет широкое применение в различных областях, где спутниковые снимки используются для анализа и мониторинга. Особенно это актуально для:

- Мониторинга состояния инфраструктуры, включая дороги, мосты и другие объекты.

- Экологического мониторинга, где точность распознавания объектов, таких как водоемы, лесные массивы и сельскохозяйственные поля, критична для оценки состояния экосистем.

- Геологического и сельскохозяйственного мониторинга, где необходимо различать объекты с малым контрастом и минимизировать влияние внешних искажений.

Комбинированное использование медианного и адаптивного фильтров для обработки спутниковых снимков является эффективным методом устранения различных типов шума, сохраняя при этом важные детали изображения. Этот подход может значительно улучшить качество данных, получаемых с космических аппаратов, и обеспечить более точные результаты анализа для различных приложений, включая экологический мониторинг, сельское хозяйство и геологические исследования.

Список литературы

1. Тормозов В.С. Автоматизированное детектирование и классификация объектов в транспортном потоке на спутниковых снимках города // Программные продукты и системы. 2022. Т 35. № 2. С. 246-254.

2. Международная межведомственная научно-техническая конференция «Космические технологии-2023»: сб. науч. тр. / под ред. С.Н. Замуруев., А.Г. Васильев, С.У. Увайсов, М.С.Костин, Д.А. Карпов, С.В. Боков. М.: РТУ МИРЭА, 2024. 234 с.

3. Холопов И.С., Штрунова Е.С. Основы цифровой обработки изображений: учеб. пособие для вузов/ под ред. М.Е.Цветковой. Рязань: Редакционно-издательский центр РГРТУ, 2023. 80 с.

4. Бабаян П.В., Муравьев В.С., Смирнов С.А., Стротов В.В. Обработка изображений в системах обнаружения и сопровождения объектов. Классические методы: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Н. Серова, Ю.С. Бехтина. М.: Горячая линия – Телеком. 2024. 168 с.

5. Соловьев Н.А. Цифровая обработка информации в задачах и примерах: учеб. пособие для вузов/ под ред. А.М. Пищухина. Оренбург: ОГУ, 2016. 122 с.

6. Болотова Ю.А. А. А. Друки, В. Г. Спицын. Методы и алгоритмы интеллектуальной обработки цифровых изображений: учеб. пособие для вузов/ под ред. Е.Л. Тен. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. 208 с.

7. Борисова И.В. Компьютерное зрение. Цифровая обработка и анализ изображений: учеб. пособие для вузов/ по ред. Е.Е.Татарниковой. Новосибирск: Типография НГТУ, 2022. 163 с.

8. Седьмая научно-техническая конференция студентов и аспирантов МИРЭА - Российского технологического университета: Сборник трудов, 23–28 мая 2022. М.: РТУ МИРЭА, 2022. 871 с.

9. Вознесенский А., Каплун Д., Каримов А., Тутуева А. Исследование алгоритмов пространственно-временной обработки изображений и видео // Компоненты и технологии. Вып. 231. 2020. С. 70-73.

10. Гаврилова Н.А. Обоснование выбора метрики для оценки качества передачи потокового видео // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2020. Вып. 3. С. 45-49.

11. Винтаев В.Н., Жиленев М.Ю., Маторин С.И., Ушакова Н.Н. Техника формирования и коррекции резкости космических изображений высокого разрешения // Научный результат. Информационные технологии. 2016. Т.1. Вып. 1. С. 72-80.

Кулакова Айгуль Фанисовна, магистрант, Kulakova.aiguul@yandex.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет

THE USE OF A MEDIAN AND ADAPTIVE FILTER FOR SATELLITE IMAGE PROCESSING

A.F. Kulakova

The use of a median filter to eliminate point noise ("salt and pepper") and Gaussian noise and its combined use with an adaptive filter to suppress noise in images is considered. The proposed approach ensures the preservation of image details and object boundaries, which makes it effective for analyzing satellite data in the tasks of monitoring infrastructure, environmental changes and agricultural planning. Examples of image processing are provided to demonstrate improved image quality, and the advantages, limitations, and possibilities of adjusting filters to improve accuracy are discussed.

Key words: satellite images, noise reduction, median filter, adaptive filter, Gaussian noise, salt and pepper, image processing, infrastructure monitoring, image quality improvement, remote sensing data analysis.

Kulakova Aigul Fanisovna, master's, Kulakova.aiguul@yandex.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technical University

УДК 352/354-1
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-233-234

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М.С. Токарев, А.В. Смирнов

В статье рассматриваются алгоритм оценки качества управленческих решений в процессе функционирования сложных организационно-технических систем.

Ключевые слова: организационно-техническая система, оценка качества систем, множество, алгоритм.

Процесс функционирования сложных организационно-технических систем (ОТС) в современных условиях характеризуется все большим увеличением количества учитываемых факторов. Динамичность происходящих процессов приводит к существенному возрастанию значимости как отдельных факторов, так и их совокупности в процессе достижения цели функционирования ОТС.

При функционировании ОТС в сложной динамичной обстановке, лицам, принимающим управленческое решение, необходимо знать хотя бы приближенные оценки качества потенциальных вариантов, на основе которых впоследствии представляется возможность выбора наиболее рационального из них.

Оценка качества принимаемого управленческого решения в процессе функционирования ОТС достаточно сложна в связи с многокритериальностью показателей, а также их зависимостью от конкретного содержания решаемых задач.

В настоящее время при формализации процесса принятия управленческого решения широко используется метод экспертных оценок. Однако при решении многокритериальных задач, качество принятого решения во многом зависит от субъективных факторов: знаний, умений, практического опыта эксперта при решении подобных задач и в отдельных случаях бывает неудовлетворительным.

Оценка качества принимаемого управленческого решения базируется на получении комплексного показателя. Анализ проведенных исследований по данной тематике показывает, что он может включать в себя следующие критерии: точность δ_0, достоверность P_0, ресурс r_0, полноту β_0 и оперативность ΔT_0.

При этом, обязательно должна вводится совокупность неравенств и ограничений:

$$\delta \le \delta_0,\ P \ge P_0,\ \ \Delta T \le \Delta T_0,\ \ r \ge r_0,\ \ \beta \ge \beta_0 \qquad (1)$$

Поскольку сформированный вариант решения в конечном итоге включает в себя большое количество составляющих и, кроме того, не всегда известно их влияние на конечный результат, то использование обычных методов для формализованного описания оценки качества управленческого решения весьма ограничено.

Однако, оно может быть проведено с использованием теории нечетких множеств. При этом оценка вариантов принятия решения возможна на основе использования нечеткого отношения предпочтения.

Постановку задачи по оценки качества управленческого решения в процессе функционирования ОТС с использованием теории нечетких множеств можно сформулировать следующим образом:

Обозначим:

$Z = \{z_i\}$, $i = 1...n$ – множество задач;

$K = \{k_j\}$, $j = 1...m$ – множество критериев оценки качества управленческого решения;

$\{V_{ij_k}\}$, $k = 1,2,...k$ – множество вариантов решений.

Каждому решению соответствует определенная степень его принадлежности множеству решений: $\mu_{\{V_{ij_k}\}}(v_{ij_k}) \in [0,1]$.

Определим на множестве рассматриваемых вариантов решений $\{V_{ij_k}\}$ для каждого $V_{ijk} \in \{V_{ij_k}\}$ нечеткое подмножество характеризующее решение определенного качества по критерию *j* для задачи *i*.

$$Y_{ij_k} = \left\{ V_{ij_k}, \lambda^{ij}_{\tilde{Y}_{ijk}}\left(V_{ij_k}\right) \right\}, \quad \lambda_{\tilde{V}_{ijk}}\left(V_{ij_k}\right) \in L^{ij}_k$$

где L^{ij}_k - множество, имеющее вид числового интервала [0,1]

Данная постановка задачи позволяет задать исходное множество способов в нечеткое признаковое пространство.

Требуется: определить оценку качества вариантов решений $\mu(v^*_s)$, и получить значение оценки оптимального варианта решения $\mu(v^*_o)$.

Решение данной задачи предлагается проводить по следующему алгоритму.

1. Определить $\tilde{V}_{ij_k} = \{v_{ij_k}, \mu_{\tilde{V}}(v_{ij_k})\}$, $V_{ij_k} \subset V$ - нечеткое подмножество, характеризующее решение определенного качества по критерию *j* для *i* варианта.

2. Задать нечеткое отношение R_{ij} (согласования или различения), определяемые контекстом задачи:

$$R_{ij} = \{(v_{ijr}, v_{ijl}) \mid v_{ijr}, v_{ijl} \in V, \ f_r(v_{ijr}) \geq f_l(v_{ijl})\}. \tag{2}$$

3. Найти функции принадлежности нечеткого отношения:

$$\mu_{ij}(v_{ijr}, v_{ijl}) = \begin{cases} 1, v_{ijr} \succ v_{ijl}; \\ 0.5, v_{ijr} \leftrightarrow v_{ijl} \\ 0, v_{ijr} \prec v_{ijl} \end{cases} \tag{3}$$

где $v_{ijr} \succ v_{ijl}$ означает, что *r*-й вариант решения *i*-й задачи по *j*-му критерию предпочтительнее *l*-го варианта; $v_{ijr} \leftrightarrow v_{ijl}$ означает, что варианты решения одинаковы по предпочтительности.

4. Провести агрегирование:

$$\mu_{\cap}(v_{ijr}, v_{ijl}) = \min_{i,j} m_{ij} \mu_{ij}(v_{ijr}, v_{ijl}),$$
$$\mu_{\cup}(v_{ijr}, v_{ijl}) = \sum_{i,j} m_{ij} \mu_{ij}(v_{ijr}, v_{ijl}), \tag{4}$$

где $m_{ij} \geq 0$, $\sum_{j=1}^{n_2} \sum_{i=1}^{n_1} m_{ij} = 1$, m_{ij} учитывает различие в степени важности критериев.

5. Определить $$\mu_{\cap}(v_{ijr}) = 1 - \sup_{x_l \in X} \left(\mu_{\cap}(v_{ijl}, v_{ijr}) - \mu_{\cap}(v_{ijr}, v_{ijl})\right) \tag{5}$$

в $\{V, \mu_{\cap}(v_{ijr}, v_{ijl})\}$ по всем *r* и *l*, $r \neq l$.

6. Найти $$\mu_{\cup}(v_{ijr}) = 1 - \sup_{x_l \in X} \left(\mu_{\cup}(v_{ijl}, v_{ijr}) - \mu_{\cup}(v_{ijr}, v_{ijl})\right) \tag{6}$$

в $\{V, \mu_{\cup}(v_{ijr}, v_{ijl})\}$ по всем *r* и *l*, $r \neq l$.

7. Найти пересечение $\mu_{\cap}(v_{ijr})$ и $\mu_{\cup}(v_{ijr})$ $\quad \mu(v_{ijr}) = \min(\mu_{\cap}(v_{ijr}), \mu_{\cup}(v_{ijr}))$. (7)

8. Найти множество оптимальных решений и их оценки $\mu(v^*_s)$.

$$V^* = \left\{ v^*_s \mid v^*_s \in V, \ \mu(v^*_s) = \sup_{v_{ijr} \in V} \mu(v_{ijr}) \right\} \tag{8}$$

9. Оценить индекс нечеткости множества решений, по которому возможно определить достоверность решения:

$$\alpha(V^*) = 2 \sup_{x_{ijr}} \min(\mu_{\cap}(v_{ijr}, v_{ijl}), \mu_{\cup}(v_{ijr}, v_{ijl})). \tag{9}$$

$\alpha(V^*)$ - индекс нечеткости задачи

10. Провести проверку оптимальности и разрешимости выбранного варианта управленческого решения. Для этого необходимо выполнить следующие шаги:

а) связать с каждым V_{ijr} нечеткое информационное множество $\tilde{V}_{ijr}$ с функциями принадлежности $\mu^{ij}_{\tilde{V}_r}(V_{ijr}) = \delta^{ij}(V_{ijr})$ (для всей совокупности параметров) и получить набор нечетких подмножеств $\tilde{V}_{ij1},...,\tilde{V}_{ijm}$.

б) для каждой пары $\tilde{V}_{ijr}, \tilde{V}_{ijl}$ подсчитать относительное обобщенное расстояние Хемминга:

$$\delta_p = \frac{1}{n}\sum_{i,j}\left|\mu^{ij}_{\tilde{V}_r}\left(v_{ijr}\right) - \mu^{ij}_{\tilde{V}_l}\left(v_{ijl}\right)\right| \tag{10}$$

где n - число признаков на p - уровне анализа.

в) на основе этого выражения необходимо построить отношение несходства на множестве $\{V_{ijm}\}$. Для построения отношения вычисляют минимакс – или *(min - sum)* - транзитивное замыкание:

$$\tilde{R} = R_{HC} \cap R^2_{HC} \cap \ldots \cap R^K_{HC} \cap \ldots; \quad \left(R^2_{HC}\right)_{kl} = \wedge_u\left(\left(R_{HC}\right)_{ku} \vee \left(R_{HC}\right)_{ul}\right). \tag{11}$$

На его основе строится матрица $R_{нс}$ соответствующих транзитивных расстояний $\delta\left(\tilde{V}_{ijr}, \tilde{V}_{ijl}\right)$ в признаковом пространстве:

г) на основе полученной матрицы строится схема декомпозиции, используя введенное транзитивное расстояние, и выделяют транзитивно равноотстоящие классы (подмножества), соответствующие разным значениям δ: $\delta\left(V_{ijr}, V_{ijl}\right) = 0$; $\delta\left(V_{ijr}, V_{ijl}\right) = \delta_1$ и т.д.

д) определяется максимальное значение при котором рассматриваемые способы решения $V_1,...V_k$ ещё различаются:

$$\delta_{\max} = \max_p \delta_p, \tag{12}$$

е) проверяется условие существования решения, для решения необходимо и достаточно

$$\alpha\left(V^*\right) < \delta_{\max}, \quad p = \overline{1,P}, \tag{13}$$

где δ_p - относительное обобщенное расстояние Хемминга на р - уровне анализа; $\alpha\left(V^*\right)$ - индекс нечеткости; $\delta_{\max}$ - мера несходства вариантов решения.

Если условие (13) не выполняется, то выбирается другой уровень анализа, форма относительного обобщенного расстояния и вид свертки, а затем решение проводится по вышеприведенному алгоритму.

Исходя из результатов проверки достоверности решения и оценки качества решения, делают окончательный вывод о способах решения, и определяют оценку качества ее решения.

Кроме того, после этого возможен выбор одной из способов качество решения, с помощью которой максимальное:

$$\mu\left(v^*_o\right) = \max_{x_s \in X^*} \mu\left(v^*_s\right). \tag{14}$$

Рассмотренный алгоритм оценки качества отработки управленческого решения в процессе функционирования ОТС позволяет:

- формализовать процесс оценки решения;
- разработать программное обеспечение и автоматизировать процесс принятия управленческого решения;
- проверять достоверность полученной оценки качества управленческого решения и определять возможность принятия рационального решения при данном уровне информации, для чего вводится критерий решаемости при имеющемся уровне информации**.**

Таким образом, с помощью алгоритма оценки качества отработки управленческого решения в процессе функционирования ОТС можно спрогнозировать оценку качества решения и выбрать наиболее подходящую информационную технологию для ее решения.

Список литературы

1. Орлов А.И. О развитии системной нечеткой интервальной математики // Философия математики: актуальные проблемы. Математика и реальность. Тезисы Третьей всероссийской научной конференции; 27-28 сентября 2013 г. / Редкол.: Бажанов В.А. и др. Москва, Центр стратегической конъюнктуры, 2013.

2. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование: в 3 ч.: Ч.1. Нечисловая статистика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 541 с.

3. Орлов А.И. Основания теории нечетких множеств (обобщение аппарата Заде). Случайные толерантности // Алгоритмы многомерного статистического анализа и их применения. М.: Изд-во ЦЭМИ АН СССР, 1975.

4. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование: в 3 ч.: Ч.2. Экспертные оценки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.

Токарев Максим Сергеевич, канд. воен. наук, старший преподаватель, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,

Смирнов Алексей Вадимович, канд. воен. наук, преподаватель, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

ASSESSMENT OF THE GUALITY OF MANAGEMENT DECISIONS IN THE PROCESS OF FUNCTIONING OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

M.S. Tokarev, A.V. Smirnov

The article considers an algorithm for assessing the guality of management decisions in the process of functioning of complex organizational and technical systems.

Key words: organizational and technical systems, system quality assessment, plenty, algorithm.

Tokarev Maxim Sergeevich, candidate of military sciences, senior lecturer, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Smirnov Alexey Vadimovich, candidate of military sciences, lecturer, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 355.55; 004.7
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-236-237

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТРЕНАЖЕРНОЙ БАЗЫ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ СИМУЛЯТОРОВ ПОДГОТОВКИ КОНТРОЛЯ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА

В. Ф. Овчаров

Рассматривается процесс разработки, создания и внедрения в учебный процесс симуляторов боевой машины ЗРПК «Панцирь-С», для подготовки курсантов при обучении в военном учебном центре для качественной подготовки при проведении занятий по специальной подготовке.

Ключевые слова: классный тренажёр, симулятор, курсант.

В военном учебном центре курсанты кафедры на классном тренажере ЗРПК «Панцирь-С» (9Ф676-1) осваивают практические навыки ведения противовоздушного боя в различных условиях. Они учатся уничтожать различные цели, включая беспилотные летательные аппараты, крылатые ракеты и другое высокоточное оружие, применяемое в ходе специальной военной операции.

Несмотря на все свои преимущества и значительные возможности по имитации боевой обстановки, классный тренажёр боевой машины «Панцирь-С» не способен выполнять некоторые функции, необходимые для подготовки к ведению противовоздушного боя. К таким функциям относятся обеспечение питания, установление оперативно-командной связи, навигационное обеспечение подразделения, а также проведение регламентных работ в процессе технического обслуживания.

В связи с этим за короткий период коллектив кафедры осуществил рационализаторские работы по разработке симуляторов: пульта управления системой электропитания боевой машины ЗРПК, блока управления автоматизированного комплекса средств связи, координатора навигационной системы и программного комплекса для проведения регламентных работ.

Созданные симуляторы размещены на учебном тренажёре ЗРПК «Панцирь-С» так же, как и в настоящей боевой машине. Это позволило одновременно изучать рабочие места, а также алгоритмы подготовки и переведение в боевую готовность систем.

Курсанты проводят первые практические занятия на симуляторе пульта управления системой электропитания (рабочий модуль СЭП), который предназначен для обучения их запуску и контролю электропитания боевой машины ЗРПК. Этот симулятор позволяет воспроизводить функционал реальной системы в двенадцати рабочих режимах, а также в аварийных ситуациях при подключении боевой машины как к дизель-генератору, так и к промышленной сети. Рабочий модуль СЭП представлен на рисунке 1.

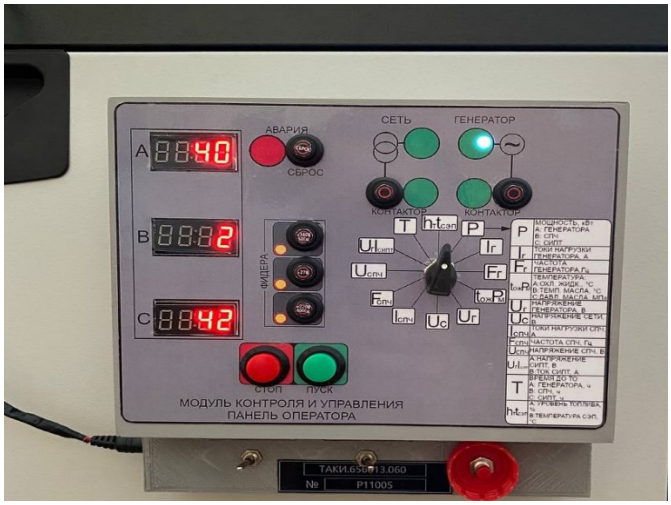


Рис. 1. Рабочий модуль СЭП

Для оценки правильности работы курсантов организована система обратной связи, которая позволяет преподавателю получать на персональный компьютер информацию о текущем состоянии каждого пульта отдельно. Это дает возможность контролировать и проверять характеристики, выдаваемые симулятором пульта управления

системой электропитания при работе курсантов. В локальной сети объединены шесть рабочих модулей, расположенных на каждом рабочем месте классного тренажера, и аппаратно-программный комплекс преподавателя, который управляет этой сетью.

Аппаратно-программный комплекс представляет собой автоматизированное рабочее место преподавателя, разработанное на персональном компьютере. Его интерфейс включает окна для выбора ошибок, отображения параметров дисплеев рабочих модулей и индикатора готовности системы электропитания.

Интерфейс аппаратно-программного комплекса представлен на рисунке 2.

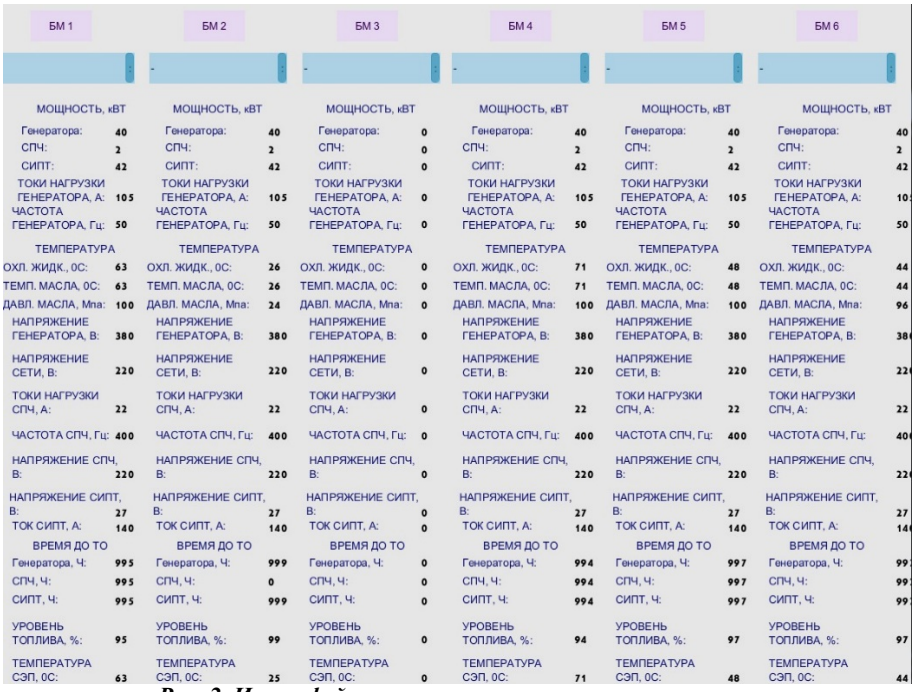


Рис. 2. Интерфейс аппаратно-программного комплекса

С использованием этой программы и локальной сети во время занятий можно не только отслеживать корректность действий боевого расчёта, но и вводить задания (неисправности) для рабочих модулей. Структурная схема рабочих модулей показана на рисунке 3.

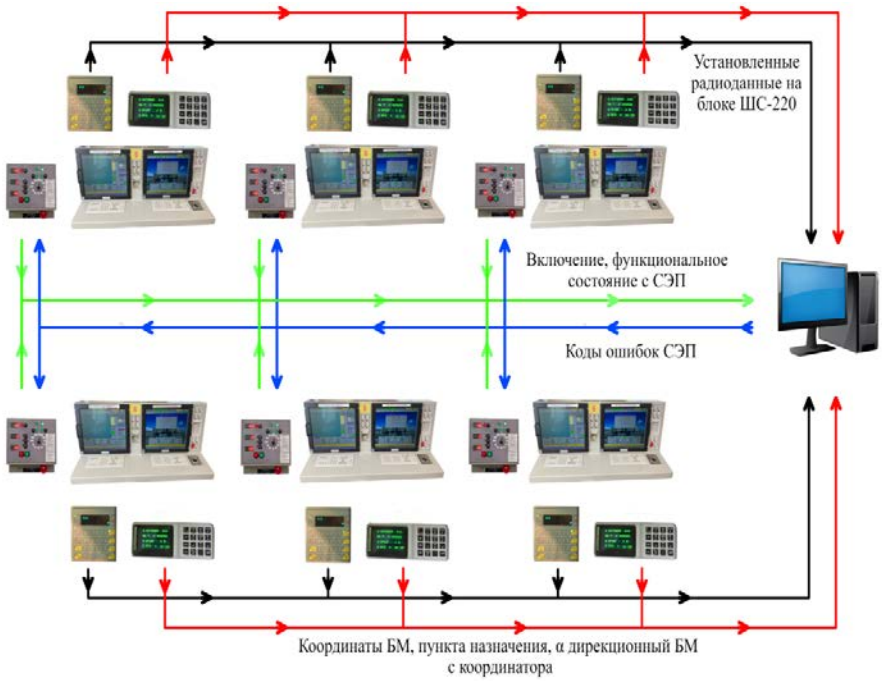


Рис. 3. Структурная схема локальной сети рабочих модулей

Для проведения теоретических занятий и самостоятельной подготовки курсантов в других аудиториях предусмотрена возможность отключения модулей от аппаратно-программного комплекса, что позволяет использовать их в качестве самостоятельного симулятора.

В дальнейшем курсанты отрабатывают навыки подготовки к боевой работе средств связи на симуляторе пульта управления автоматизированного комплекса. Это дает им возможность не только изучить панель управления и принцип ее функционирования, но и на практике освоить ввод радиоданных в радиостанцию. Структура меню аналогична той, что используется в боевой машине, а расположение кнопок, индикация и экран симулятора разработаны так, чтобы максимально точно воспроизводить пульт управления автоматизированным комплексом средств связи. Симулятор также позволяет контролировать правильность ввода радиоданных, отображая их на компьютере преподавателя в режиме реального времени.[1]

Рабочее место для подготовки навигационной аппаратуры оборудовано симулятором координатора навигационной системы и аппаратно-программным комплексом, который воспроизводит пульт командира боевой машины. Симулятор координатора навигационной системы боевой машины ЗРПК «Панцирь-С» представлен на рисунке 4. На этом рабочем месте отрабатываются навыки, связанные с алгоритмом включения навигационной системы, контролем её работы и согласованием с вычислительной системой картографии боевой машины. Создание данного рабочего места стало необходимым из-за отсутствия функции ввода данных в навигационную систему на классном тренажёре ЗРПК «Панцирь-С».



Рис. 4. Симулятор координатора навигационной системы боевой машины ЗРПК «Панцирь-С

Здесь была разработана визуальная копия отображаемой информации при переходе на вкладку «Система навигации» и «Задания маршрута» представленным на рисунке 5 вычислительной системы картографии. Все окна были активированы, что дало возможность вводить данные и обмениваться информацией с координатором.

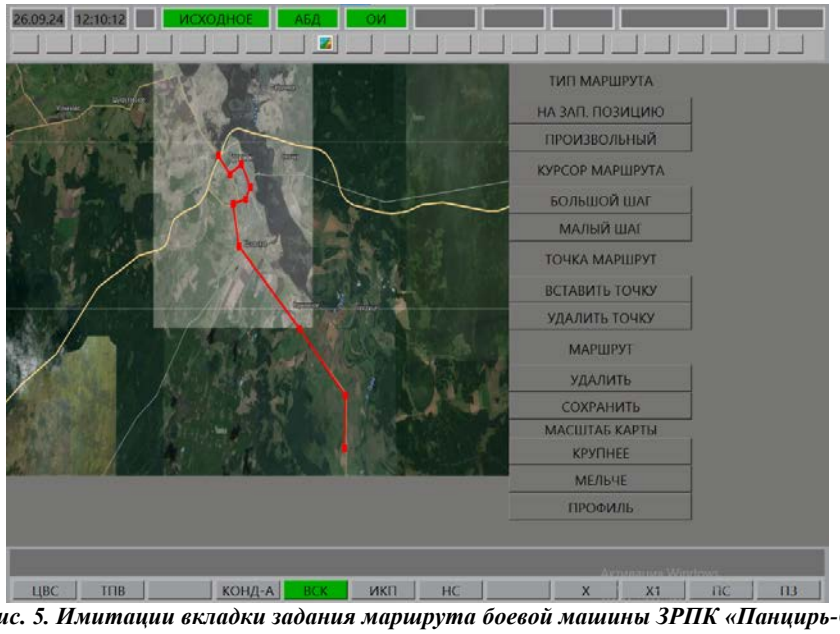


Рис. 5. Имитации вкладки задания маршрута боевой машины ЗРПК «Панцирь-С

Аппаратно-программный комплекс для пульта командира боевой машины был разработан на единой платформе с программой моделирования системы регламентных работ. Основным аспектом разработки является не только симуляция функционирования вычислительной системы картографии, но и создание качественной имитации, отражающей работу боевой машины во время технического обслуживания. В отличие от традиционного тренажера, разрабатываемое программное обеспечение позволяет проводить проверки систем автоматизированного комплекса

связи, многофункциональной радиолокационной станции и оптико-электронной системы. Интерфейс аппаратно-программного комплекса представлен на рисунке 6. Будущая модификация системы предполагает не только расширение её функционала, но и создание симулятора пульта командира боевой машины, который позволит полностью освоить навыки технического обслуживания аппаратуры.

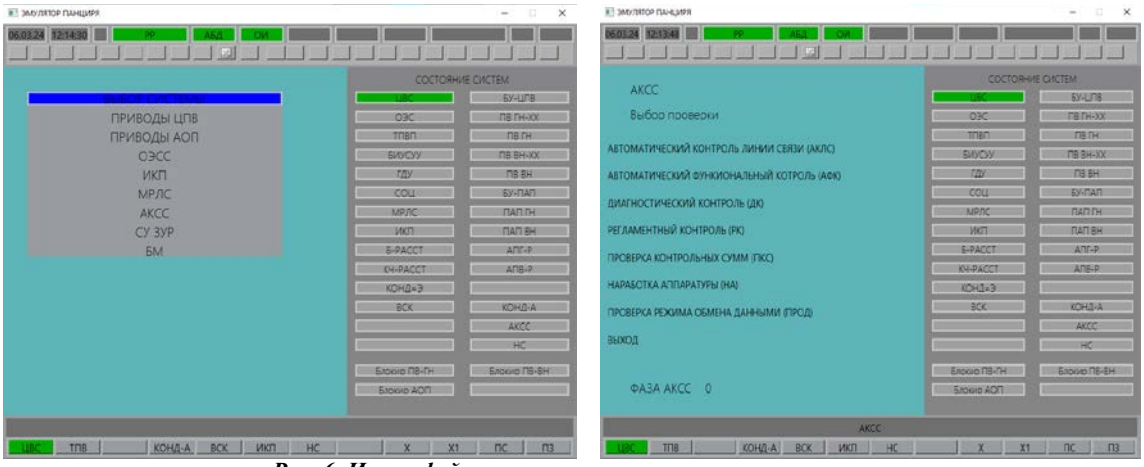


Рис. 6. Интерфейс аппаратно-программного комплекса

В настоящее время рационализаторский кружок занимается интеграцией учебно-тренировочного комплекса С-400, эмулятора АК Ф2К, тренажёра ЗРПК «Панцирь-С» и имеющейся на кафедре учебно-боевой техники для неавтоматизированного управления в единую оперативно-командную сеть. Это позволит эффективно отрабатывать вопросы подготовки и управления группировкой войск, оснащенной различными зенитными ракетными системами и комплексами, для отражения массированных ракетно-авиационных ударов с использованием современных ударных систем как воздушного, так и наземного базирования, а также для защиты стартовых позиций от диверсионно-разведывательных групп в ходе выполнения учебно-тактической задачи по дисциплине «Тактика ЗРВ ВКС» на кафедре ВКС.

Список литературы

1. Неизвестный М.И., Костылев А.А., Спицын А.И., Овчаров В.Ф. Создание имитатора пульта ШС-220 и пульта дистанционного управления системы электропитания классного тренажера 9Ф676-1 для практических занятий с курсантами кафедры ВКС. Теория и практика военного образования в гражданских вузах: педагогический поиск // Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский Федеральный университет. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2022. 409 с.

Овчаров Виктор Фёдорович, доцент, v.f.ovcharov@urfu.ru, Россия Екатеринбург, Уральский федеральный университет

EXPANDING THE CAPABILITIES OF THE TRAINING ROOM BASES BY IMPLEMENTING SIMULATORS PREPARATION OF CONTROL OVER THE OPERATION OF THE COMPLEX

V.F. Ovcharov

The process of developing, creating and implementing simulators of the ZRPC «Pantsir-C» combat vehicle into the educational process is considered, for training cadets during training at a military training center for high-quality training during special training classes.

Key words: cool simulator, simulator, cadet.

Ovcharov Viktor Fedorovich, docent, v.f.ovcharov@urfu.ru, Russia, Yekaterinburg, Ural Federal University

УДК 681.518.5:004.67
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-240-241

ЭФФЕКТИВНОСТЬ FFTW И MATH.NET: АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ

В.А. Дышлевский, В.Ю. Кобенко, И.С. Кудрявцева, А.П. Науменко

Рассмотрена эффективность библиотек для вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ) — FFTW и Math.Net. Основное внимание уделено анализу времени вычисления преобразования в зависимости от длины выборки и количества многократных вызовов функций. По результатам анализа выявлены особенности работы каждой библиотеки и на основании этого представлены рекомендации по выбору оптимальной библиотеки в зависимости от конкретных задач и требований к производительности.

Ключевые слова: преобразование Фурье, FFTW, Math.Net.

Введение. Несмотря на значительный прогресс в области технологий, большая часть аварий по-прежнему происходит по вине человека. Ярким примером этого является авария на Саяно-Шушенской ГЭС, произошедшая из-за игнорирования показаний датчиков относительной вибрации [1]. Аналогичным образом, причиной аварии на Ачинском НПЗ стало ненадлежащее выполнение обязанностей экспертами в области промышленной безопасности [2]. Анализ данных инцидентов подчёркивает необходимость внедрения специализированных систем мониторинга и диагностики (СМД) технического состояния оборудования [3, 4].

Системы такого рода предназначены для отслеживания изменений информативных параметров, которые могут служить критериями наличия дефектов. Наиболее значимым в области технической диагностике является контроль состояния параметров вибрации [5, 6, 7]. Информативным параметром в вибродиагностике является спектр сигнала, а для перехода из временной области в частотную используется преобразование Фурье (ПФ) [8, 9]. Это, в свою очередь, накладывает определённые требования для СМД в области использования готовых инструментов для расчёта ПФ, которые должны обеспечивать максимальное быстродействие. В настоящее время наиболее известными являются библиотеки с открытым исходным кодом Math.Net [10] и FFTW [11].

Math.NET – это библиотека .NET, предоставляющая числовые методы, в том числе реализации БПФ. Она разработана для удобства использования в приложениях .NET, однако может быть менее оптимизирована, чем FFTW, для некоторых сценариев [10].

FFTW, разработанная на языке C, представляет собой высокооптимизированную библиотеку быстрого преобразования Фурье (БПФ) и считается одной из самых быстрых библиотек в этой области. Она использует сложный этап планирования для оптимизации вычислений в зависимости от размера входных данных и архитектуры [11].

Для вычисления дискретного преобразования Фурье в FFTW используются фрагменты кода, которые являются высоко-оптимизированными, компонуемыми блоками кода C. Данные фрагменты называются – кодлетами (англ. codelet). Комбинация кодлетов задаётся специальной структурой данных, называемой планом (англ. plan) [12, 13].

Для вычисления БПФ с помощью FFTW необходимо создать план:

```
fftw_plan fPlan;
fPlan = fftw_plan_dft_1d(N, *in, *out, sign, flags);
```

Функция «fftw_plan_dft_1d» создаёт план для вычисления дискретного преобразования Фурье массива комплексных данных размером N.

Аргументы «in» и «out» указывает на входные и выходные массивы преобразования. Если вместо out указать массив in, то результат преобразования будет перезаписан во входной массив.

Параметр «sign» задаёт направление преобразования и принимает значение «-1» для прямого ПФ и «+1» для обратного.

Параметр «flags» задаёт строгость процесса планирования. Например, флаг FFTW_MEASURE вычисляет БПФ разными алгоритмами и в дальнейшем производит сравнение времени расчета. В результате создается план с оптимальным алгоритмом для входного массива «in».

Для выполнения БПФ по созданному плану используется команда:

```
fftw_execute(fPlan);
```

Также можно применить ранее созданный план к новым массивам «newIn» и «newOut», для этого необходимо использовать команду:

```
fftw_execute(fPlan, newIn, newOut);
```

По окончании работы программы все ресурсы, выделенные для выполнения БПФ и массивов данных, должны быть правильно возвращены. Для этого необходимо вызвать функции:

```
fftw_destroy_plan(fPlan);
fftw_free(in);
fftw_free(out);
```

Библиотека FFTW также включает множество реализаций для вычисления преобразований Фурье многомерных массивов как с комплексными, так и с вещественными данными.

В данной статье был произведён расчёт времени вычисления преобразования Фурье гармонического сигнала с разным количеством отсчётов. Также был выполнен анализ влияния частоты вызова функции БПФ на время расчёта.

Оценка времени вычисления преобразования Фурье для разных длин выборки. В обеих рассматриваемых библиотеках сообщается, что массивы входных значений для БПФ могут иметь произвольную длину. При этом отмечается, что Math.Net эффективен для длин равных 2^n, в то время как FFTW лучше всего подходит для обработки размеров вида $2^a \cdot 3^b \cdot 5^c \cdot 7^d \cdot 11^e \cdot 13^f$, где e + f равно либо 0, либо 1, а остальные показатели произвольны. Данное утверждение подтверждается результатами, представленными на рисунках 1 и 2.



Рис. 1. Зависимость времени расчёта БПФ от размера входного массива равного 2^n



Рис. 2. Зависимость времени расчёта БПФ от размера входного массива равного $2^a \cdot 3^b \cdot 5^c \cdot 7^d \cdot 11^e \cdot 13^f$

Расчёт времени вычисления преобразования Фурье при многократном вызове функции. Мониторинг технического состояния машин, повреждения которых могут привести к серьёзным последствиям, требует непрерывного контроля уровня вибрации. В связи с этим системы мониторинга и диагностики нуждаются в многократном вызове функции БПФ. Для исследования влияния частоты вызова функции БПФ на время расчёта был проведён ряд экспериментов. Полученные результаты представлены на рисунках 3 и 4.

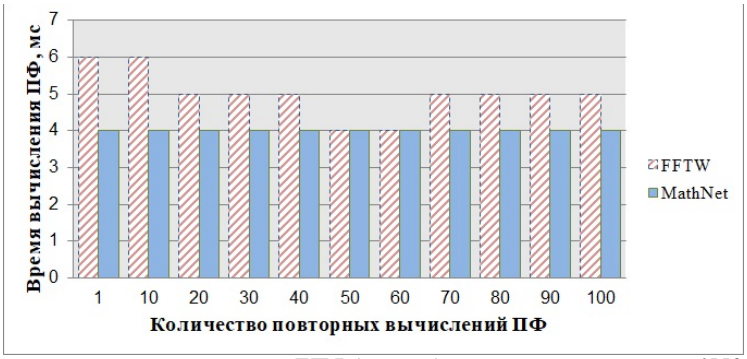


Рис. 3. Зависимость времени расчёта БПФ для входного массива размером 65536 отсчетов от частоты вызова функции

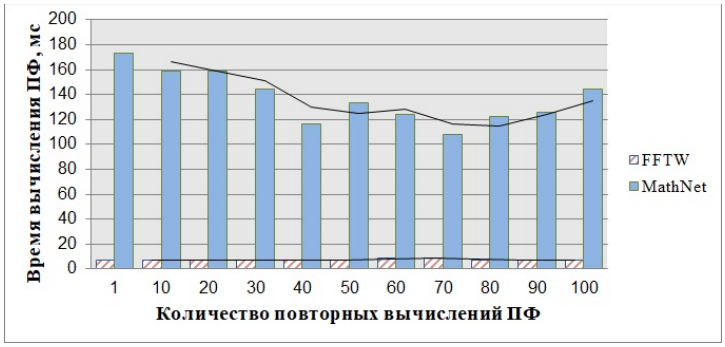


Рис. 4. Зависимость времени расчёта БПФ для входного массива размером 68640 отсчетов от частоты вызова функции

Результаты показывают, что время расчёта БПФ для длин равных $\mathbf{2^n}$ у Math.Net не зависит от количества повторных вызовов, в то время как у FFTW это значение колеблется. При этом для размеров равных $2^a \cdot 3^b \cdot 5^c \cdot 7^d \cdot 11^e \cdot 13^f$, FFTW демонстрирует стабильное поведение.

Заключение. Проведённый анализ позволяет сделать вывод о том, что для обеспечения максимальной производительности СМД при непрерывном контроле уровня вибрации рекомендуется использовать библиотеку FFTW. В то же время библиотека Math.Net может быть применена для периодического контроля, что делает её подходящей для менее ресурсоёмких задач.

Эти выводы подтверждаются полученными количественными показателями, демонстрирующими эффективность применения каждой из библиотек, а именно:

- для входных массивов размером от 1024 до 32768 отсчетов время вычисления ПФ библиотеками FFTW и Math.Net одинаково. Но для размеров более 32768 отсчетов FFTW производит вычисления в 1,5 раза медленней.

- для входных массивов размером от 1040 до 17160 отсчетов время вычисления преобразования Фурье библиотекой Math.Net растет от 1 мс до 18 мс, в то время как у FFTW остается неизменным. С увеличением длины входной выборки Math.Net производит расчет ПФ приблизительно в 15 раз медленнее.

Список литературы

1. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года // Ростехнадзор. М.: Ростехнадзор, 2009. 123 с.

2. Матевосян Г.А., Долгушина Л.В. Прогнозирование обстановки при аварийных ситуациях на Ачинском НПЗ // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций : Сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции Железногорск, 16 октября 2020 года. Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий, 2020. С. 151-154.

3. Костюков В.Н., Костюков А.В., Костюков А.В. Мониторинг риска эксплуатации оборудования в реальном времени // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 4. С. 126-129.

4. Костюков В.Н., Науменко А.П. Проблемы и решения безопасной эксплуатации поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. 2008. № 3. С. 21-28.

5. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. Standardization in the sphere of vibrodiagnostic monitoring of piston compressors // Oil and gas engineering (OGE-2015) Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation, 25-30 April 2015, 2015. P. 370-380.

6. Сушко А.Е., Демин М.А. Особенности внедрения экспертных систем автоматизированной диагностики // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2011. № 4. С. 51-55.

7. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. Technology of piston compressors real-time diagnostics and monitoring // 11th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies 2014, CM2014 / MFPT2014 (Manchester, United Kingdom 10-12 June 2014): Proceedings. NY : Curran Associates, Inc., 2014. P. 580–590.

8. Тимошенко Л.И. Дискретное преобразование Фурье и его быстрые алгоритмы // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 12-2. С. 188-193.

9. Ширшина Е.А., Петушков М.И. Анализ частотно-временных методов обнаружения повреждений, при анализе нестационарных сигналов // Роль науки и образования в модернизации и реформировании. 2023. С. 70.

10. Nkurikiyeyezu K., Ahishakiye F., Nsengimana C., Ntagwirumugara E. Toolkits for real time digital audio signal processing teaching laboratory // Journal of Signal and Information Processing. 2015. Т. 6. №. 2. С. 92-98.

11. Frigo M., Johnson S. G. FFTW: Fastest Fourier transform in the west // Astrophysics Source Code Library. 2012. С. ascl: 1201.015.

12. Frigo M., Johnson S. G. FFTW: An adaptive software architecture for the FFT // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. IEEE, 1998. Т. 3. С. 1381-1384.

13. Бурцев А.А. Внедрение в библиотеку FFTW собственных модулей, применяющих специализированный сопроцессор для ускорения операций преобразования Фурье // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. 2016. Т. 6, № 2. С. 101-109.

Дышлевский Вячеслав Александрович, аспирант, dva_08_99@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Кобенко Вадим Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, kobra_vad@rambler.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Кудрявцева Ирина Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, s_iren@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Науменко Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, apnaumenko@omgtu.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

THE EFFECTIVENESS OF FFTW AND MATH.NET: A CALCULATION TIME ANALYSIS OF THE FOURIER TRANSFORM DEPENDING ON THE PARAMETERS

V.A. Dyshlevskiy, V.Y. Kobenko, I.S. Kudryavtseva, A.P. Naumenko

The effectiveness of libraries for computing the discrete Fourier transform (DFT) — FFTW and Math.NET has been considered. The main focus is on the analysis of computation time for the transformation depending on the sample length and the number of multiple function calls. Based on the results of the analysis, the peculiarities of each library's operation have been identified, and recommendations for selecting the optimal library have been presented based on specific tasks and performance requirements.

Key words: fourier transform, FFTW, Math.NET.

Dyshlevskiy Vyacheslav Aleksandrovich, postgraduate, dva_08_99@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Kobenko Vadim Yurievich, doctor of technical sciences, professor, kobra_vad@rambler.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Kudryavtseva Irina Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, s_iren@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Naumenko Aleksandr Petrovich, doctor of technical sciences, professor, apnaumenko@omgtu.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 004.896
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-243-244

ОБНАРУЖЕНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕШТАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ НА ОСНОВЕ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ДАННЫХ ОБ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИИ

А.В. Блохин

В данной статье рассмотрены вопросы обнаружения и прогнозирования нештатных состояний оборудования на городском ресурсоснабжающем предприятии. Предложено использовать модель машинного обучения на основе ансамбля деревьев решений для обнаружения и прогнозирования нештатных состояний оборудования на основе анализа ретроспективных данных об электропотреблении предприятия. Проведен сравнительный анализ эффективности применения предложенного метода, основанного на ансамбле деревьев решений по сравнению с экспертным методом.

Ключевые слова: электропотребление, ретроспективные данные, обнаружение состояний оборудования, машинное обучение, градиентный бустинг.

Введение. Современные промышленные предприятия и энергосбытовые компании постоянно сталкиваются с необходимостью прогнозирования энергопотребления для обеспечения стабильной работы производственных процессов и оптимизации затрат [1-5] Одной из ключевых задач в этом процессе является своевременное выявление аномальных состояний оборудования, таких как отключения и включения, которые могут негативно сказываться на общей производительности предприятий и создавать угрозу для бесперебойного энергоснабжения [6-9].

Энергосбытовые компании, работающие на Оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ), сталкиваются с серьезными вызовами в обеспечении точного краткосрочного прогнозирования. ОРЭМ – это платформа, где осуществляется торговля электроэнергией и мощностью между производителями и потребителями электрической энергии [10-11]. Для энергосбытовых компаний точность прогнозирования энергопотребления напрямую влияет на их финансовые показатели, поскольку позволяет оптимизировать закупки электроэнергии на рынке «на сутки вперед», минимизировать риск переплат за излишки и штрафов за дефицит купленной электроэнергии [12].

Краткосрочные прогнозы также важны для крупных промышленных потребителей, таких как городские ресурсоснабжающие предприятия [13-15]. Эти прогнозы позволяют эффективно планировать работу оборудования, избегать внеплановых отключений и оптимизировать затраты на электроэнергию. Отклонения от прогнозируемого потребления могут свидетельствовать о сбоях в работе оборудования, таких как внезапное отключение или включение дополнительных производственных линий, что требует оперативного реагирования и корректировки процессов [16-19].

Для успешного управления и планирования электроэнергии предприятиям необходимо прогнозировать как среднесрочные, так и краткосрочные изменения в энергопотреблении. Краткосрочные прогнозы (на срок от нескольких часов до нескольких дней) позволяют минимизировать риски для обеих сторон:

– для энергосбытовых компаний точность планирования покупки электроэнергии позволяет избежать необходимости закупки электроэнергии по более высоким ценам на балансирующем рынке и предотвратить финансовые потери от небаланса между предложением и спросом [20];

– для крупных потребителей точность планирования дает возможность оптимизировать операционные процессы, избегать перегрузок и возможных сбоев оборудования, что особенно важно для предприятий с непрерывным циклом производства, а также финансовые потери [21].

Машинное обучение, и в частности алгоритм XGBoost, стал мощным инструментом для решения задач краткосрочного прогнозирования электропотребления. XGBoost использует ансамбли деревьев решений и показывает высокую точность в задачах прогнозирования временных рядов, что делает его оптимальным выбором для анализа данных о потреблении электроэнергии. Применение этого метода позволяет как энергосбытовым компаниям, так и крупным предприятиям улучшить прогнозирование энергопотребления, снижая вероятность неожиданных сбоев и минимизируя финансовые потери [9].

Цель и задачи исследования. Целью данного исследования является разработка модели для обнаружения нештатных состояний оборудования (включение дополнительного оборудования/аварийные выключения) на основе данных об электропотреблении и прогнозирование возможных таких аномалий в краткосрочной перспективе.

Задачи исследования:

– сбор и предварительная обработка ретроспективных данных о потреблении электроэнергии;

– разработка алгоритма на основе XGBoost для обнаружения нештатных состояний оборудования;

– прогнозирование возможных нештатных состояний оборудования в краткосрочной перспективе;

– визуализация результатов, проверка точности и достоверности модели.

Исходные данные. Для анализа и прогнозирования нештатных состояний оборудования на предприятии использовались ретроспективные данные по электропотреблению, предоставленные АО «ОмскВодоканал». Это предприятие отвечает за обеспечение города Омска водоснабжением и водоотведением, и его деятельность требует надежного и стабильного электроснабжения для поддержания работы насосных станций, очистных сооружений и другого важного оборудования.

Данные охватывают период с 1 января 2020 года по настоящее время и содержат почасовые данные потребления электроэнергии на предприятии. Это позволяет не только анализировать текущие и прошлые тенденции потребления, но и выявлять нештатные ситуации, такие как внезапные отключения оборудования или включение дополнительных мощностей.

Основные параметры данных:

– Момент времени (час): временной штамп, указывающий момент измерения с точностью до часа;

– Мощность (кВт*ч): количество прямой, потребляемой предприятием и обратной, потребляемой субабонентами предприятия, электроэнергии, за каждый час.).

Таблица 1

Исходные данные об электропотреблении на предприятии (фрагмент)

Интервал времени, час	**Мощность, кВт*ч**	
	Активная прямая	***Активная обратная***
14.10.2024 01:00	14 853,72	-2 003,59
14.10.2024 02:00	14 415,12	-2 032,09
14.10.2024 03:00	14 320,56	-2 018,82
14.10.2024 04:00	15 287,64	-2 095,70
14.10.2024 05:00	16 653,60	-2 106,65
…	…	…
15.10.2024 00:00	15 376,68	-2 020,10

Алгоритм работы метода. В данной работе для анализа и прогнозирования использовалась модель XGBoost, примененная к временным рядам данных электропотребления на предприятии. Процесс построения модели можно разделить на несколько этапов: предварительная обработка данных, настройка модели, оценка её производительности и визуализация результатов.

Шаг 1. Предварительная обработка данных. Исходные данные по электропотреблению предприятия АО «ОмскВодоканал» включают почасовые наблюдения с 1 января 2020 года по настоящее время.

Основные этапы предобработки данных:

1. Удаление выбросов и пропусков:

Для удаления выбросов использовались статистические методы (метод 3-х сигм), позволяющие определить аномально высокие или низкие значения.

Пропуски в данных, возникавшие из-за сбоев в записи показаний, заполнялись методом линейной интерполяции:

$$x(t) = x(t-1) + \frac{x(t+1)-x(t-1)}{2}, \quad (1)$$

где x(t) – потребление электроэнергии в момент времени t.

2. Создание дополнительных признаков: Для повышения точности прогнозирования были созданы дополнительные признаки:

– скользящее среднее (SMA) за предыдущие три часа, которое позволяет сглаживать краткосрочные колебания и выявлять тренды:

$$SMA(t) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x(t-i), \quad (2)$$

где n – окно сглаживания;

– изменение потребления (Δx) по сравнению с предыдущими часами:

$$\Delta(t) = x(t) - x(t-1) \quad (3)$$

Эти признаки позволяют модели лучше учитывать временные зависимости в данных.

Шаг 2. Разработка модели XGBoost

XGBoost – это ансамблевый метод градиентного бустинга, который строит деревья решений последовательно, где каждое новое дерево минимизирует ошибки предыдущих, как показано графиком дерева решений на рисунке 1.

Целевая переменная: потребление электроэнергии на следующий час.

Признаки: наряду с фактическими значениями потребления энергии в каждый момент времени, модель использует созданные дополнительные признаки, такие как скользящее среднее и разница в потреблении.

Основная функция потерь $L(y_i, \hat{y}_i)$, минимизируемая моделью:

$$L(y_i, \hat{y}_i) = \frac{1}{2}(y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (4)$$

где y_i – фактическое потребление электроэнергии, $\hat{y}_i$ – прогнозируемое значение.

Шаг 3. Настройка гиперпараметров модели

Для настройки модели XGBoost проводилась кросс-валидация с целью оптимизации гиперпараметров:

– число деревьев (n_estimators): Определяет количество деревьев решений, включенных в ансамбль. Для текущего исследования оптимальным было количество около 100 деревьев;

– максимальная глубина деревьев (max_depth): Чем больше глубина дерева, тем более сложные зависимости модель может находить, но также возрастает риск переобучения. В работе использовалось значение max_depth

= 6;

– темп обучения (learning_rate): Контролирует шаг обновления модели в процессе градиентного спуска. Чем меньше темп обучения, тем больше шагов необходимо для достижения оптимума, но меньше риск переподгонки данных. В исследовании был выбран темп $learning\_rate$ = 0.1.

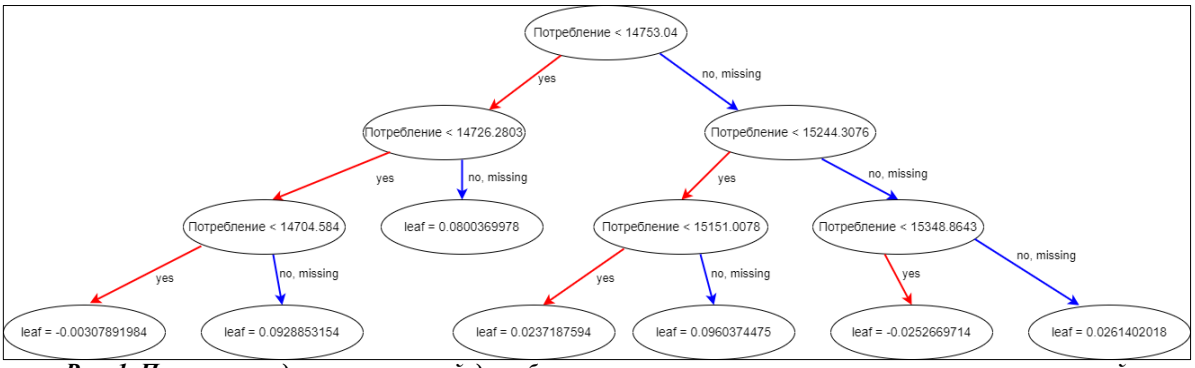


Рис. 1. Построение деревьев решений для обнаружения и прогнозирования нештатных состояний оборудования на предприятии на основе ретроспективных данных электропотребления

Формула обновления весов на каждом k-м шаге градиентного спуска:

$$\omega_{k+1} = \omega_k - \eta \cdot \nabla L(\omega_k), \quad (5)$$

где η – темп обучения, $\nabla L(\omega_k)$ – градиент функции потерь.

Шаг 4. Оценка производительности модели. Для оценки качества модели использовались следующие метрики:

– средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \quad (6)$$

– корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

Оценка модели проводилась на тестовой выборке, которая составляла 20% от общего объема данных. Для повышения надежности результатов использовалась кросс-валидация с разбиением на 5 фолдов.

Шаг 5. Прогнозирование и обнаружение нештатных состояний оборудования. На заключительном этапе модель использовалась для прогнозирования краткосрочных изменений в потреблении электроэнергии на следующие 24 часа. Программа анализировала данные по следующим правилам:

– если снижение потребления превышало 100±10 кВт/ч в течение нескольких часов, это рассматривалось как сигнал о возможном отключении оборудования;

– если наблюдалось увеличение потребления на аналогичную величину, это указывало на включение дополнительного оборудования.

Для прогнозирования использовалась следующая формула:

$$\hat{x}(t+h) = \sum_{k=1}^{K} f_k(x(t), x(t-1), \ldots, x(t-n)), \quad (8)$$

где h – шаг прогноза (в часах), f_k – предсказания k-го дерева в ансамбле, а K – количество деревьев.

Визуализация результатов: на графике отмечались моменты включения/отключения оборудования с использованием маркеров, что позволило визуально оценить работу модели представлены на рисунке 2.

Сравнение результатов работы модели XGBoost и текущего экспертного метода.

В настоящий момент на предприятии АО «ОмскВодоканал» для мониторинга и диагностики состояний оборудования применяется традиционный экспертный метод. Этот метод основан на ручном анализе показателей потребления электроэнергии и опыта специалистов предприятия, которые на основании своих наблюдений принимают решения о наличии сбоев в работе оборудования. Несмотря на свою надежность в определенных случаях, экспертный метод обладает рядом недостатков, таких как субъективность оценок, человеческие ошибки, а также невозможность оперативной обработки больших объемов данных.

Для оценки эффективности предлагаемого алгоритма XGBoost было проведено сравнение результатов его работы с результатами, полученными экспертами предприятия и оперативным журналом нештатных состояний оборудования, который ежедневно ведётся на предприятии.

Экспертный метод основывается на визуальном анализе графиков энергопотребления и выявлении резких отклонений, что делает его зависимым от человеческого фактора. Специалисты определяют отклонения в потреблении электроэнергии на основе собственного опыта и знаний об особенностях работы оборудования, что может приводить к пропуску менее очевидных аномалий.

Модель XGBoost, в свою очередь, автоматически анализирует временные ряды и точно выявляет изменения в потреблении электроэнергии, которые могут свидетельствовать о включении или отключении оборудования. Применение алгоритма машинного обучения позволяет фиксировать даже незначительные изменения, которые могут быть пропущены экспертами. Модель анализирует данные не только в реальном времени, но и ретроспективно, что дает возможность оценивать поведение оборудования на основе многолетних данных.

Модель XGBoost продемонстрировала точность обнаружения аномальных состояний на уровне 92,4 %, тогда как экспертный метод – 81,1 %.

Модель фиксировала изменения потребления с задержкой менее чем в один час, в то время как эксперты могли замечать отклонения только через несколько часов после их начала.

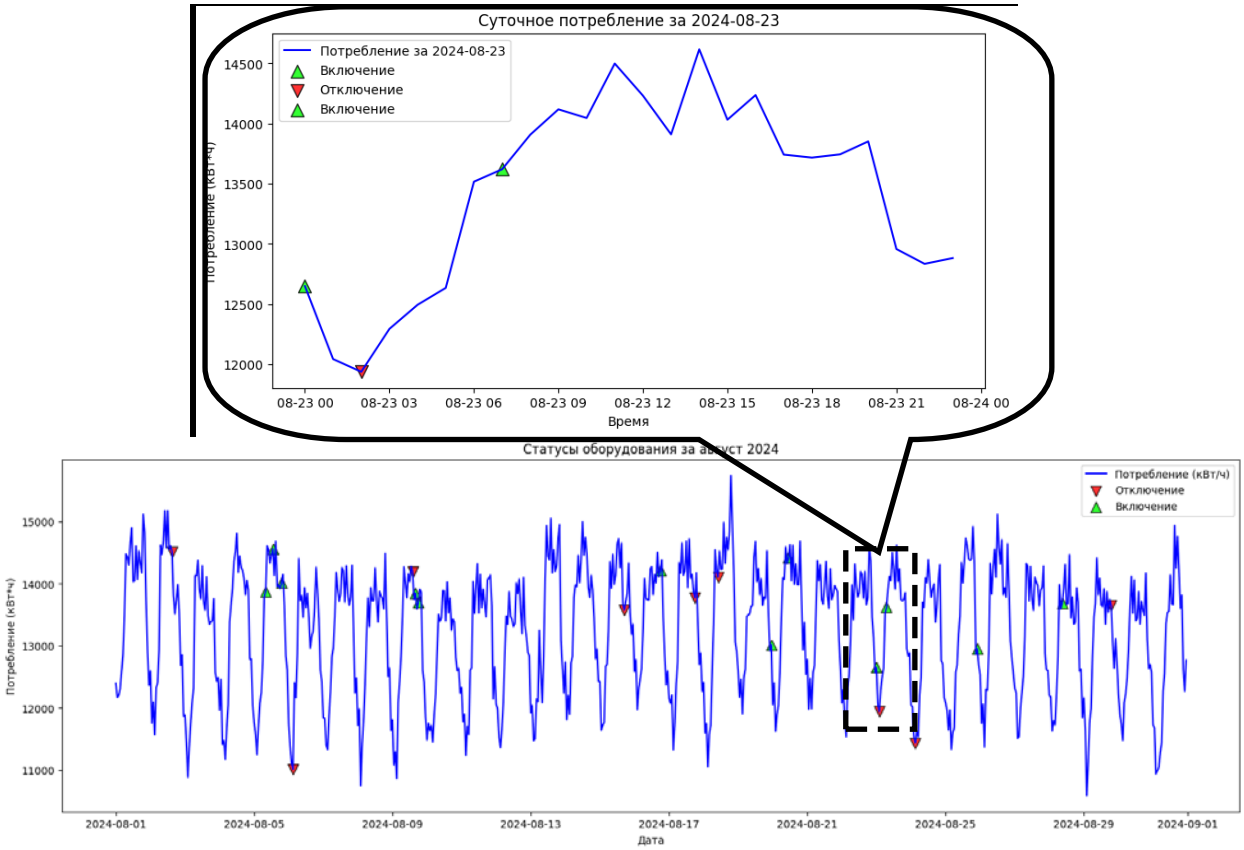


Рис. 2. Результаты работы модели по обнаружению и прогнозирования нештатных состояний оборудования на предприятии

Таблица 2

Ошибка обнаружения нештатных ситуаций в работе оборудования на предприятии при использовании ансамбля деревьев решений и экспертного метода

Количество наблюдений в ретроспективных данных	**Метод обнаружения**	
	Экспертный	XGBoost
	Средняя абсолютная ошибка MAE, %	
10	23,7	14,1
…	…	…
30	22,2	12,3
…	…	…
50	21,5	10,6
…	…	…
70	19,4	9,8
…	…	…
100	18,9	7,6

Как видно из таблицы и гистограмм на рисунке 3 при увеличении количества наблюдений (размера обучающей выборки для модели XGBoost) средняя абсолютная ошибка *MAE* снижается, как и для экспертного метода, так и для модели ансамблей решающих деревьев. В отношении экспертного метода – это снижение можно связать с тем, что эксперт визуально наблюдает больший период ретроспективных данных и может сопоставить верные зависимости в потреблении электроэнергии и возможных отключениях/включениях оборудования на предприятии. Что касается модели XGBoost – это можно объяснить тем, что при кратном увеличении обучающей выборки, также увеличивается количество деревьев в модели, что влечёт к большему усреднению результатов работы каждого дерева и уменьшению влияния результатов тех деревьев, которые возможно имеют ошибочные результаты работы.

Обсуждение результатов. Результаты проведенного исследования показали явные преимущества использования модели XGBoost для обнаружения и прогнозирования аномальных состояний оборудования на предприятии. В процессе сравнения работы модели с текущим экспертным методом были выявлены следующие ключевые аспекты, заслуживающие внимания.

Модель XGBoost продемонстрировала высокую точность в задаче обнаружения отключений и включений оборудования. Точность обнаружения аномальных состояний составила 92,4 %, что значительно выше по сравнению с точностью экспертного метода, который показал результат 81,1 %.

Этот результат объясняется способностью модели XGBoost учитывать более сложные закономерности в данных, что позволяет ей фиксировать даже незначительные изменения в потреблении электроэнергии, которые могли бы остаться незамеченными при ручном анализе. Важно отметить, что экспертный метод опирается на субъективный опыт специалистов и ручной анализ, что снижает его точность и приводит к более частым ошибкам в обнаружении малозаметных изменений.

Анализ ошибок показывает, что модель XGBoost допускает меньше ошибок как при обнаружении состояний оборудования (отключения/включения), так и при прогнозировании. Гистограмма ошибок модели по сравнению с экспертным методом продемонстрировала, что модель ошибается реже, а величина ошибок (по абсолютной разнице) также ниже.

Ошибки модели, как правило, связаны с редкими случаями, когда изменения потребления были минимальными и попадали в пограничные значения, не превышающие заданных порогов. Экспертный метод, в свою очередь, показал больше ошибок, особенно при малозаметных изменениях, что подчеркивает его ограниченность в сложных сценариях анализа данных.

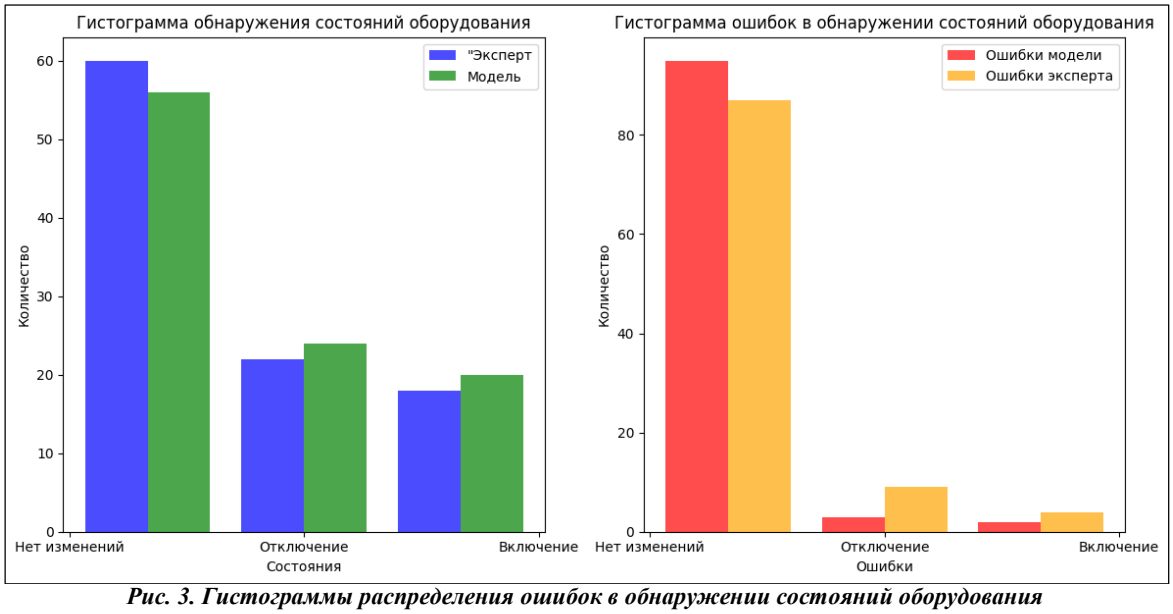


Рис. 3. Гистограммы распределения ошибок в обнаружении состояний оборудования

Заключение. Проведенные исследования подтвердили эффективность применения модели машинного обучения, основанной на ансамбле деревьев решений для обнаружения и прогнозирования нештатных состояний оборудования на предприятии на основе данных электропотребления. Предложенная модель, показала значительно более высокую точность и скорость в обнаружении и прогнозировании нештатных ситуаций в работе оборудования по сравнению с традиционным экспертным методом, что подтверждается оперативным журналом нештатных состояний оборудования на предприятии.

Следует отметить, что экспертный метод обладает преимуществом в интерпретируемости, полагаясь на опыт и знания специалистов, но его недостатки – медленная обработка данных и склонность к ошибкам из-за человеческого фактора – делают его менее эффективным в условиях современной автоматизации. Модель машинного обучения, основанная на ансамбле решающих деревьев, напротив, обеспечивает не только высокую точность прогнозов, но и исключает влияние субъективных факторов, что значительно снижает риск пропуска нештатных ситуаций в работе оборудования на предприятии.

Таким образом, предложенная модель машинного обучения является более предпочтительным и эффективным решением для задачи обнаружения и прогнозирования нештатных состояний оборудования. Она позволяет предприятию оперативно реагировать на изменения в состоянии оборудования, снижая экономические потери при планировании электропотребления предприятия.

Список литературы

1. Модели прогнозирования электрических нагрузок / В.В. Смирнов, Е.Ю. Чернова, М.А. Старченко, Т.С. Максименко // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4, № 4. С. 103–109.

2. Серебряков Н.А. Применение адаптивного ансамблевого нейросетевого метода для краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса районных электрических сетей // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 39–45.

3. Using system analysis methods to search for coolant leaks in order to develop an automated information system for dispatch control of a heat generating enterprise / E.V. Chebanenko, A.S. Gritsay, R.N. Khamitov [et al.] // Journal of Physics. 2020. Vol. 1546, no. 1. P. 012046-1–012046-7. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012046.

4. Блохин А.В. Исследование факторов, влияющих на потребление электроэнергии коммерческим предприятием / А.В. Блохин, А.С. Грицай, А.Ю. Горшенин // Математические структуры и моделирование. 2022. № 3 (63). С. 39–47. DOI: 10.24147/2222-8772.2022.3.39-47.

5. Горшенин А.Ю. Предварительная обработка данных в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления / А. Ю. Горшенин, А. С. Грицай, Л. А. Денисова // Фёдоровские чтения 2023 : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (с элементами науч. шк. для молодежи). Нац. исслед. ун-т «МЭИ». Москва: Изд-во МЭИ, 2023. С. 96–104.

6. Король А.В. Сравнение адаптивных методов краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями / А. В. Король, А. С. Грицай, А. В. Гаак // Актуальные вопросы энергетики : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2024. С. 190–195.

7. Грицай А.С. Особенности построения биллинговой системы для энергосбытовой компании с целью обеспечения максимальной точности прогнозирования // Динамика систем, механизмов и машин: тез. докл. Междунар. научн.-техн. конф. Омск : ОмГТУ, 2009. С. 250–254.

8. Потапов В.И., Грицай А.С., Тюньков Д.А. Спектральный анализ ретроспективных данных ООО “Омская энергосбытовая компания” об электропотреблении // Омский научный вестник. 2016. № 5(149). С. 74-76.

9. Горшенин А.Ю., Грицай А.С., Денисова Л.А. Применение машинного обучения деревьев решений для краткосрочного прогнозирования электропотребления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 226–231. DOI 10.24412/2071-6168-2023-11-226-227.

10. Хомутов С.О., Хамитов Р.Н., Грицай А.С., Серебряков Н.А. Методика формирования обучающей выборки в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления гарантирующего поставщика // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 227-233.

11. О механизмах функционирования оптового рынка электроэнергии / Д. Д. Дугин, В. А. Самусь, Д. К. Габбасов [и др.] // Актуальные вопросы энергетики: материалы Международной научно-практической конференции. Омск: Омский государственный технический университет, 2017. С. 239-243.

12. Бахтеева Н.З., Галимзянов Л.А., Шацких З.В. Конкурентный оптовый рынок электроэнергии и мощности: состояние и новые вызовы // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 70-78.

13. Федоров Я.П., Бурковский В.Л., Руцков А.Л. Повышение точности прогнозирования электропотребления субъектов ОРЭМ с использованием нечётких нейронных сетей // Энергетические системы. 2019. № 1. С. 176-182.

14. Васильев В.А. Обзор подходов по прогнозированию цен на электроэнергию с использованием технологий вычислительного интеллекта // Теоретическая экономика. 2020. № 5(65). С. 87-94.

15. Горшенин А.Ю. Сравнение методов на основе деревьев решений в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления // Математические структуры и моделирование. 2023. № 4(68). С. 12-21. DOI 10.24147/2222-8772.2023.4.12-21.

16. Воевода А.Е., Харитонова Д.Д., Валь П.В. Краткосрочное прогнозирование электропотребления на основе метода случайного леса // Электроэнергетика глазами молодежи - 2016 : Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3 т. Том 2. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. С. 124-127.

17. Vasina D., Gorshenin A. Application of the Catboost Gradient Boosting Method in Forecasting Solar Electricity, 2023 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russian Federation, 2023. P. 1-5. DOI: 10.1109/Dynamics60586.2023.10349541.

18. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A scalable tree boosting system, 2016. arXiv.org. Available at: DOI: 10.48550/arXiv.1603.02754.

19. Li P., Zhang J.S. A new hybrid method for china’s energy supply security forecasting based on ARIMA and xgboost // Energies. 2018. Vol. 11, No. 7. P. 1687. DOI 10.3390/en11071687.

20. Мигранов М.М., Устинов А.А., Мельников А.В. Прогнозирование потребления электроэнергии. Практика применения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2(47). С. 44-53.

21. Моргоева А.Д., Моргоев И.Д., Клюев Р.В., Гаврина О.А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 7. С. 115-125. DOI 10.18799/24131830/2022/7/3527.

Блохин Александр Владимирович, аспирант, sasha_bloh@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

DETECTION AND PREDICTION OF ABNORMAL EQUIPMENT CONDITIONS AT AN ENTERPRISE BASED ON HISTORICAL DATA ABOUT POWER CONSUMPTION

A.V. Blokhin

This article discusses the issues of detecting and predicting abnormal conditions of equipment at a municipal utility company. It is proposed to use a machine learning model based on an ensemble of decision trees to detect and predict abnormal conditions of equipment based on the analysis of retrospective data on the enterprise's electricity consumption. A comparative analysis of the efficiency of using the proposed method based on an ensemble of decision trees compared to the expert method is carried out.

Key words: power consumption, historical data, hardware state detection, machine learning, gradient boosting.

Blokhin Alexandr Vladimirovich, postgraduate, sasha_bloh@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 004.032.26
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-249-250

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

А.Ю. Горшенин, А.С. Грицай, В.Ю. Кобенко, Е.Г. Андреева

В статье рассмотрены вопросы формирования доверительного интервала при краткосрочном прогнозировании электропотребления. В исследовании применяется метод бутстрэп-итераций для построения доверительных интервалов, что способствует учету случайных вариаций в данных и улучшает оценку степени уверенности прогнозов. Приведены результаты построения графика с доверительным интервалом.

Ключевые слова: электропотребление, доверительный интервал, бутстрэп-итерация, прогнозирования, машинное обучение, управление ресурсами.

Введение. Прогнозирование электропотребления является важным элементом обеспечения стабильности и надежности работы энергосистем [1–5]. Неопределенность прогнозов представляет существенные трудности для эффективного управления и распределения ресурсов. Оценка этой неопределенности важна при краткосрочном прогнозировании, поскольку отклонения могут привести к избыточному или недостаточному распределению ресурсов, что влияет на экономическую эффективность участников Оптового рынка электрической энергии и мощности [6,7].

Одним из методов для оценки неопределенности является формирование доверительного интервала (ДИ), который позволяет количественно определить диапазон значений, в котором с заданной вероятностью находится истинное значение прогноза. В исследовании применяется метод бутстрэп-итераций, который создает несколько выборок данных для обучения моделей прогнозирования. Этот подход учитывает случайные колебания и определяет уровень уверенности в прогнозах.

Также исследуется возможность применения гибридной модели прогнозирования для краткосрочного прогноза с учетом неопределенности (разработка моделей и ход исследования подробно описаны в работах [8–12]). Используемые методы бутстрэп-анализа и статистической обработки данных позволяют сформировать доверительные интервалы для каждого часа прогнозирования. Оценка доверительных интервалов способствует повышению точности прогнозов и учету разнообразия возможных исходов.

Представленные результаты показывают, что применение бутстрэп-подхода для формирования доверительных интервалов минимизирует систематические и случайные ошибки в прогнозировании, что делает этот метод перспективным для краткосрочных прогнозов в условиях высокой неопределенности.

Целью исследования является разработка алгоритма оценки неопределенности краткосрочных прогнозов электропотребления с использованием доверительных интервалов. Это включает построение доверительных интервалов для каждого часа прогнозирования на основе бутстрэп-итераций, что позволит учесть случайные вариации в данных и определить степень уверенности прогнозов. Исследование направлено на повышение точности прогнозов электропотребления, обеспечивая более эффективное управление энергетическими ресурсами.

Формирование доверительного интервала. Идея формирования доверительного интервала заключается в использовании информации из аналогичных временных периодов ретроспективных данных для оценки неопределенности прогнозов. Для этого применяется метод бутстрэп-итераций [13], позволяющий создать несколько выборок данных, на которых обучаются модели прогнозирования. Далее эти модели используются для оценки прогнозов на тестовых данных, что позволяет учесть разнообразие возможных исходов. Результатом является оценка ДИ для каждого часа прогноза, который учитывает неопределенность прогнозов и позволяет принять во внимание возможные изменения во временных рядах данных.

В работе [14] подробно рассматриваются методы оценки и анализа погрешностей в измерениях, включая расчет доверительных интервалов. Согласно [14], доверительный интервал служит для оценки диапазона значений, в котором с заданной вероятностью находится истинное значение измеряемой величины. Важной частью такой оценки является учет случайных погрешностей и использование нормального распределения, что позволяет формировать доверительный интервал для различных уровней доверия.

Применение бутстрэп-методов также связано с повторным ресемплированием данных для оценки статистической точности. В работе [14] рассмотрены методы статистической обработки данных, которые можно сопоставить с бутстрэп-подходом, и приводятся рекомендации по выбору уровня доверия, например, 95%, исходя из допустимой погрешности и требований к точности результатов измерений.

Таким образом, в трактовке авторов использование уровня доверия 95% обусловлено необходимостью минимизации как систематических, так и случайных ошибок в рамках допустимого компромисса между шириной интервала и точностью измерений.

Для выявления границ ДИ применялся метод бутстрэп-анализа [13] в основе которого лежит ресемплирование (процесс отбора единиц наблюдений из исходного набора данных с целью формирования подвыборки). Данный метод используется для оценки распределения статистических оценок, основываясь на многократном повторении выборки с возвращением (каждый элемент исходной выборки может быть выбран несколько раз при формировании новой выборки или быть не выбранным вообще) из имеющегося набора данных. На рисунке 1 представлен алгоритм процесса построения ДИ.

На каждой сгенерированной бутстрэп-выборке обучается модель прогнозирования (гибридная модель). Вычисление стандартного отклонения прогнозов происходит для каждого часа, что позволяет оценить степень неопределенности в прогнозах модели для конкретного часа. На основе стандартного отклонения прогнозов вычисляются верхние и нижние границы доверительного интервала для каждого часа. Доверительный интервал представляет собой диапазон значений, в котором с вероятностью 95% будет находиться истинное значение прогноза.

Полученные значения ДИ позволяют оценить неопределенность в прогнозах модели каждого часа, что позволяет учитывать возможные изменения в электропотреблении и оценить уровень уверенности в прогнозах.

Проведено формирование бутстрэп-выборок где D_1, D_2, …, D_n – выборка. Опираясь на нее, можно смоделировать распределение ξ и получить необходимые выборки из смоделированного распределения.



Рис. 1. Алгоритм формирования доверительного интервала

Как известно из статистики, истинное распределение ξ по выборке D_1, D_2, …, D_n приближается эмпирически с функцией распределения:

$$F_n^* = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I(D_i < x), \quad (1)$$

где $I(A)$ – индикатор события A задается как:

$$f(n) = \begin{cases} 1, A \text{ произошло} \\ 0, A \text{ не произошло} \end{cases}. \quad (2)$$

Индикатор события используется для определения, было ли определенное наблюдение включено в бутстрэп-выборку или нет.

Имея функцию распределения можно моделировать бутстрэп-выборки необходимого объема. Это эквивалентно формированию выборок путем случайного выбора из n объектов с возвращением из исходной выборки. То есть бутстрэп-выборка объема n из выборки D_1, D_2, …, D_n будет набор $D_1^{(j)}, D_2^{(j)}, \dots, D_n^{(j)}$, где $D_i^{(j)} \in D_1, D_2, \dots, D_n$. Таким образом, после генерации бутстрэп-выборок можно вычислить оценки математического ожидания (μ) дисперсии (σ^2) и среднего отклонения (σ):

$$\hat{\mu}_B = \frac{1}{B}\sum_{j=1}^{B} \mu_j, \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{B-1}\sum_{j=1}^{B} \left(\mu_j - \hat{\mu}_B\right)^2, \quad (4)$$

Далее можно рассчитать границы нижнюю (L_B) и верхнюю (U_B) границы ДИ для каждого часа прогноза $\widetilde{W}_i$:

$$L_B = \widetilde{W}_i - z * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, U_B = \widetilde{W}_i + z * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

где B – количество бутстрэп-итераций; $\hat{\mu}_B$ –среднее значение по бутстрэп-выборкам; $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ – средняя стандартная ошибка; $z * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ – половина ширины доверительного интервала; n – размер выборки; z – критическое значение для уровня доверия 95% (для нормального распределения z = 1.96 [14]).

На рисунке 2 представлен график прогноза с доверительным интервалом.

Результаты, представленные на рисунке, показывают, что модель прогнозирования электропотребления демонстрирует высокую точность прогнозирования в течении суточного цикла. Суточная динамика электропотребления четко отражает характерные пиковые периоды и спады, связанные с изменением активности потребителей, с минимальным потреблением в ночное время и максимальными значениями ближе к полудню и вечером.

Важным результатов является узкий доверительный интервал, что свидетельствует о высокой степени уверенности модели в своих прогнозах. Верхняя и нижняя границы доверительного интервала демонстрируют небольшую разбежку, особенно в пиковые моменты потребления, что указывает на низкую неопределенность прогноза в ключевых временных точках. Это позволяет сделать вывод о том, что гибридная модель прогнозирования способна эффективно учитывать, как сезонные, так и суточные колебания электропотребления, предоставляя точные предсказания с минимальной погрешностью.

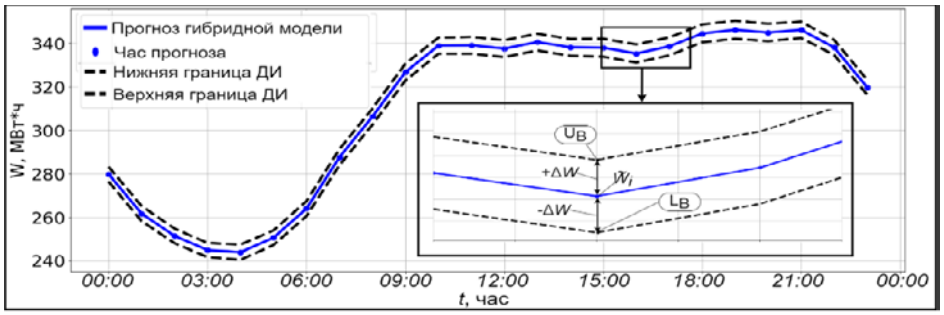


Рис. 2. Прогнозный график с доверительным интервалом

Заключение. Результаты исследования показывают, что алгоритм на основе бутстрэп-итераций эффективно оценивает неопределенность краткосрочных прогнозов электропотребления. Разработанный алгоритм позволил минимизировать систематические и случайные ошибки в прогнозах, что обеспечило более высокую точность предсказаний. Использование доверительных интервалов дает экспертам предприятий энергетического комплекса страны возможность принимать более обоснованные решения по управлению ресурсами, что в конечном итоге способствует улучшению общей стабильности системы.

Список источников

1. Горшенин А.Ю. Модель краткосрочного прогнозирования электропотребления для АО «атомэнергосбыт» с использованием ансамбля градиентного бустинга / А. Ю. Горшенин, А. С. Грицай, А. В. Николаев // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK - 2023: Сборник материалов / Сост. Р.Ш. Ахмадиева, Р.Н. Минниханов. Под общей редакцией Р.Н. Минниханова. Казань: Научный центр безопасности жизнедеятельности, 2023. С. 529-537. EDN AGWZBH.

2. Надтока И.И. Нейросетевая модель прогнозирования электропотребления с учетом освещенности на территориях операционных зон региональных диспетчерских управлений // И. И. Надтока, С. О. Губский, И. Е. Шепелев // Изв. вузов. Электромеханика. 2012. № 2. С. 18-21.

3. Макоклюев Б.И. Анализ и планирование электропотребления. Москва: Энергоатомиздат, 2008. 296 с.

4. Гнатюк В.И. Теоретические основы управления электропотреблением на базе квантовой ранговой динамики / В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун // Промышленная энергетика. 2024. № 1. С. 2-7. DOI 10.34831/EP.2024.44.59.001. EDN QYTGAO.

5. Гнатюк В.И. Обоснование качества управления электропотреблением регионального электротехнического комплекса / В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун // Промышленная энергетика. 2024. № 5. С. 13-18. DOI 10.34831/EP.2024.75.23.002. EDN GOQPXL.

6. Хамитов Р.Н. Программа построения доверительных интервалов для краткосрочного прогнозирования объемов электропотребления / Р.Н. Хамитов, А.С. Грицай, Д.К. Габбасов // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2017. № 1(92). С. 13. EDN XKOXWR.

7. Костин Н.С. О построении доверительных интервалов в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления / Н. С. Костин, А. С. Грицай // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур : материалы 11-й международной конференции. Екатеринбург: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2016. С. 32. EDN XSHCIV.

8. Горшенин А.Ю. Применение деревьев решений для краткосрочного прогнозирования электропотребления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 246-253. DOI 10.24412/2071-6168-2024-7-246-247. EDN ZCJJNA.

9. Горшенин А.Ю. Разработка и верификация программного обеспечения системы краткосрочного прогнозирования электропотребления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024.– № 7. С. 253-259. DOI 10.24412/2071-6168-2024-7-253-254. EDN JSSRYK.

10. Горшенин А.Ю. Формирование выборки исходных данных для машинного обучения модели краткосрочного прогнозирования электропотребления // Автоматизация в промышленности. 2023. № 10. С. 37-41. DOI 10.25728/avtprom.2023.10.08. EDN DKNORJ.

11. Горшенин А.Ю. Применение машинного обучения деревьев решений для краткосрочного прогнозирования электропотребления / А. Ю. Горшенин, А. С. Грицай, Л. А. Денисова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 226-231. DOI 10.24412/2071-6168-2023-11-226-227. EDN GJOPDO.

12. Горшенин А.Ю. Сравнение методов на основе деревьев решений в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления // Математические структуры и моделирование. 2023. № 4(68). С. 12-21. DOI 10.24147/2222-8772.2023.4.12-21. EDN COYBGY.

13. Bradley Efron. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife (англ.) // Annals of Statistics. 1979. Vol. 7, no. 1. P. 1-26. DOI: 10.1214/aos/1176344552.

14. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 304 с.

Горшенин Алексей Юрьевич, аспирант, augomgtu@gmail.com, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Грицай Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

Кобенко Вадим Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Андреева Елена Григорьевна, д-р техн. наук, профессор, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

FORECASTING ELECTRICITY CONSUMPTION USING CONFIDENCE INTERVALS

A.Y. Gorshenin, A.S. Gritsai, V.Y. Kobenko, E.G. Andreeva

The article considers the issues of forming a confidence interval in short-term forecasting of electricity consumption. The study uses the bootstrap iteration method to construct confidence intervals, which helps to take into account random variations in the data and improves the assessment of the degree of confidence of forecasts. The results of constructing a graph with a confidence interval are presented.

Key words: electricity consumption, confidence interval, bootstrap iteration, forecasting, machine learning, resource management.

Gorshenin Aleksey Yurievich, postgraduate, augomgtu@gmail.com, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Gritsay Alexander Sergeevich, candidate of technical science, docent, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Kobenko Vadim Yurievich, doctor of technical science, professor, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Andreeva Elena Grigorievna, doctor of technical science, professor, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 004.62
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-252-253

АЛГОРИТМ И МЕТОД ОБРАБОТКИ СЛАБОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИИ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЯХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 0,4…10 КВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕГУЛЯРНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ

А.С. Сабельников, Н.А. Серебряков, С.О. Хомутов, Е.Г. Андреева,
А.М. Парамонов, В.Ю. Кобенко, А.П. Науменко

Представлены результаты исследования по разработке алгоритма извлечения полезной информации из слабоструктурированных данных, содержащихся в электронных таблицах с непоследовательным форматированием. Предложен алгоритм извлечения слабоструктурированных данных, сущность которого заключается в предварительном анализе данных для установления позиционирования полезных данных и выявления закономерностей в их расположении. Составлены регулярные выражения для извлечения полезных данных. Реализован алгоритм и метод извлечения информации о технологических нарушениях в объектах электросетевого хозяйства с помочью инструментов генеративного искусственного интеллекта, а также его программная реализация. Полученные данные имеют практическое значение при планировании технического обслуживания и капительного ремонта.

Ключевые слова: технологические нарушения, извлечение данных, слабоструктурированные данные, регулярные выражения, передача электрической энергии.

Электроэнергетика — ключевая отрасль топливо-энергетического комплекса (ТЭК), составляющего основу экономики и жизнеобеспечения. В 2023 году доля ТЭК в ВВП России составила 20%, из которых 2,3% (8,6 трлн рублей) приходится на электроэнергетику, обеспечивающую 1,6 млн рабочих мест. Продукция отрасли занимает первое место в цепочке создания добавленной стоимости, что усиливает её мультипликативный эффект на экономику. Цифровизация и повышение эффективности электроэнергетики оказывают прямое и косвенное влияние на рост конкурентоспособности других отраслей [1].

Цифровизация и автоматизация энергетических систем обладает рядом значительных преимуществ. Среди них – снижение текущих и капитальных затрат на реконструкцию и развитие систем, уменьшение расходов на техническое обслуживание и ремонт, продление срока службы оборудования, повышение производительности труда персонала, а также множество других положительных эффектов [1].

Объективная необходимость цифровизации энергетических систем усиливается по мере их усложнения, снижения способности к самоадаптации и устойчивости перед внутренними и внешними дестабилизирующими факторами. Это особенно характерно для электроэнергетических систем, которые в большей степени подвержены таким воздействиям [1].

Одним из направлений электроэнергетики является передача электрической энергии (ЭЭ). В промышленности вопросы автоматизации зачастую касаются организации и управлением технологическим процессом. В передаче электрической энергии производственные процессы представляют собой, в частности, организацию технического обслуживания и ремонта объектов электросетевого хозяйства, другими словами, эксплуатацию. Для эффек-

тивного осуществления эксплуатации необходимо обладать как можно большим количеством данных о событиях происходящими с объектами электросетевого хозяйства (ЭСХ). Таким образом встает необходимость в организации автоматического сбора и обработки информации об объектах ЭСХ.

Одним из видов такой информации являются технологические нарушения на объектах ЭСХ и их причины. Во всех без исключений сетевых организациях ведется фиксация первичной информации и ТН и их причинах. Зачастую часть данных сведений представлены в неструктурированном или слабоструктурированном виде. Для составления статистики и проведения ее анализа необходимо как-то извлекать такие данные и приводить в структурированный вид.

Цель исследования заключается в разработке алгоритма извлечения полезных данных из слабоструктурированных источников с применением метода регулярных выражений.

Слабоструктурированные данные — это тип данных, которые имеют некоторую внутреннюю структуру, но эта структура не является строго определенной или жестко формализованной. В отличие от структурированных данных, которые хранятся в строгих форматах, таких как реляционные базы данных с четко определенными схемами, слабоструктурированные данные могут содержать вариативные и гибкие форматы [2-5].

Электронные таблицы с непоследовательным форматированием, где данные могут быть расположены в разных ячейках и листах без единой схемы являются слабоструктурированными данными.

С практически точки зрения, извлечение данных из слабоструктурированных источников позволит существенно производительность труда, а также улучшить качество эксплуатации объектов ЭСХ.

Для построения алгоритма проведем анализ слабоструктурированных данных об технологических нарушениях на примере ООО «Заринская сетевая компания» (ООО «ЗСК»).

ООО «ЗСК» является территориальная сетевой организацией, оказывающая услуги по передачи электрической энергии и технологическому присоединению. В ООО «ЗСК» сложилась практика ведения «Ежедневного рапорта», внутреннего первичного документа, отражающего наиболее значимые события в электрических сетях. Кроме всего прочего, эта форма отражает информацию о технологических нарушениях (ТН).

Данный рапорт заполняется всеми структурными подразделениями, в чем ведении находятся затронутые ТН объекты ЭСХ. Суточный рапорт ведётся с 2012 года по настоящее время и представляет собой с технической стороны форму в формате электронной таблицы Excel за отчетный месяц, где события за каждый день содержаться в отдельных листах книги. Кроме того, книга содержит множество другой информации. Сведенья о ТН могут находится на листе конкретного дня, в случае если они случались и об этом была сделана запись. В случае отсутствия ТН записи не вносились, соответственно лист не содержит полезной информации. Обратим особое внимание на то, что первичный источник информации обладает наиболее полными и достоверными данными, что очень важно для достоверности результатов последующего анализа.

Полезная информация включает в себя дату и время начала и завершения ТН, диспетчерское наименование объекта, а также причину ТН. Информация о ТН содержится в двух блоках, об отключениях в сетях 0,4 кВ и отключения в сетях 10 кВ. При этом запись диспетчерского наименования приведена в свободной форме, как и описание причины ТН.

Проведённый анализ суточных рапортов показывает, что информация о ТН занесена в слабоструктурированном виде, начитывает по меньшей мере 4000 листов. Ее обработка чревата огромными трудозатратами. Для целей обработки данных суточного рапорта разработан алгоритм извлечения полезной информации из слабоструктурированных данных. Данный алгоритм в последствии будет использован для разработки программного обеспечения по извлечению слабоструктурированных данных, аналогичного алгоритму, представленному в [6].

Блок-схема алгоритма извлечения слабоструктурированных данных из электронных таблиц с непоследовательным форматированием приведена на рисунке 1. Описание алгоритма по извлечению слабоструктурированных данных:

Начало.
Шаг 1: Определение позиционирования блоков;
Шаг 2: Извлечение строк данных из блоков;
Шаг 3: Извлечении полей из строк данных;
Шаг 4: Проверка на дублирование
Шаг 5: Внесение извлеченной информации в основные поля мастер-таблицы;
Шаг 6: Извлечение кодовых обозначений из наименования электроустановок;
Шаг 7: Внесение извлечённых кодовых обозначений в дополнительные поля мастер-таблицы;
Шаг 8: Вычисление расчетных показателей;
Шаг 9: Вывод данных;
Конец

Для шага 1 осуществляется определение позиционирования блоков. Алгоритм обрабатывает каждый лист Excel-файла последовательно, сканируя строки сверху вниз для определения начала и конца интересующих блоков.

Определение начала блока происходит следующим образом. Блок 1 определятся по наличию строки, содержащей текст «1. Отключения в сетях 10 кВ». Блок 2 определяется по наличию строки, содержащей текст "2. Отключения в сетях 0,4 кВ". При обнаружении соответствующей строки алгоритм устанавливает текущий активный блок и переходит к следующей строке для начала извлечения данных.

Затем осуществляется определение конца блока. Если встречается строка, содержащая "3. Плановые работы", алгоритм понимает, что текущий блок завершен. Также блок считается завершенным при обнаружении полностью пустой строки, что означает отсутствие дальнейших данных в блоке.

После определения активного блока алгоритм приступает к шагу 2 по извлечению строк с данными. Строки, содержащие заголовки полей, игнорируются. Пустые строки внутри блока также пропускаются, чтобы избежать обработки неинформативных данных.

Затем осуществляется обработка строк данных в соответствии с шагом 3. Для каждой строки данных внутри активного блока выполняются извлечение основных полей:

1. Наименование электроустановок. Объединение содержимого первых двух ячеек (A-B) для формирования полного наименования.

2. Время отключений и включения. Извлечение строковых значений из соответствующих ячеек (C и D), последующее преобразование их в объекты даты и времени для расчета продолжительности отключения.

3. Причина отключения и принятые меры. Конкатенация содержимого ячеек (E-J) в единый текстовый блок.

Для проведения последующего анализа извлеченных сведений важно отсутствие дублированных данных, которые могут возникнуть вследствие ошибочных действий оператора. В шаге 5 полученные данные проверяются на дублирование, выявленные дубли удаляются. Прошедшая проверку информация заносится в основные поля мастер-таблицы в шаге 6.

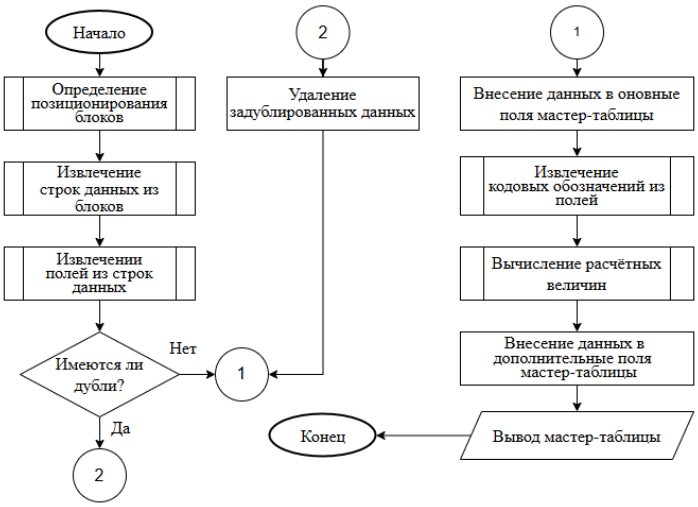


Рис. 1. Блок-схема алгоритма извлечения слабоструктурированных данных из электронных таблиц с непоследовательным форматированием

В соответствии с шагом 7 происходит извлечение кодовых обозначений из наименования электроустановок. Так как, данные о диспетчерском наименовании заносились в суточный рапорт в свободной форме, их можно отнести к слабоструктурированным данным. Для их извлечения был применен метод регулярных выражений.

Суть метода регулярных выражений в данном случае заключается в следующем. Извлекаются данные о кодовом обозначении трансформаторных подстанций (ТП) и данные о кодовом обозначении номера фидера (ЛЭП-0,4). В дальнейшем подсчет одноименных записей по этим данным позволит подсчитать количество отключений на той или иной электроустановке.

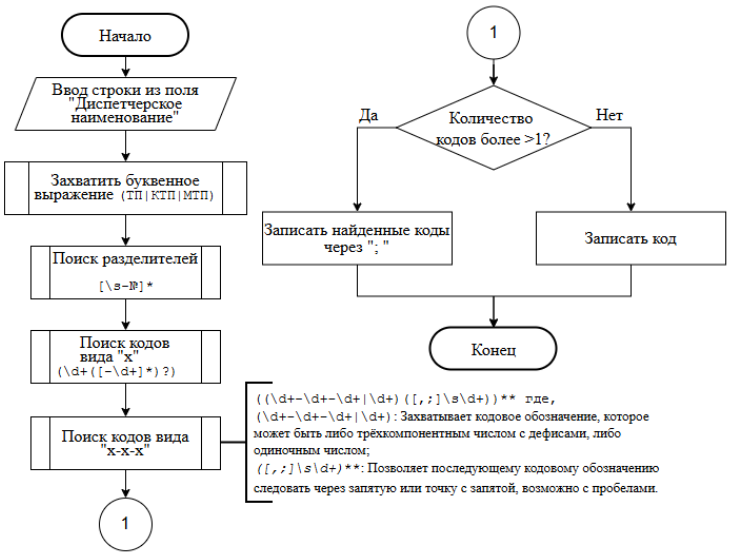


Рис. 2. Блок-схема алгоритма по захвату кодового наименования трансформаторной подстанции с помощью регулярных выражений

Данных о ТП имеет буквенное и кодовое обозначение. Для целей исследования необходимо записать только кодовое обозначение. Буквенные обозначения в суточном рапорте могут быть «ТП», «КТП», «МТП». Кодовое обозначение могут быть в виде «х-х-х» или «х», где «х» это число, которое идет строго после буквенного обозначения. Кодовое обозначение соединяется с буквенным либо пробелом, либо знаком «-», либо стоит вплотную, а также может соединятся через «№» в комбинации с пробелами или без них. В искомой строке может находится несколько записей о ТП, тогда необходимо записать кодовое обозначения всех найденных ТП через разделитель, например, точку с запятой.

Проведя анализ структуры данных о ТП был разработан алгоритм по захвату кодового наименования трансформаторной подстанции с использованием регулярных выражений, который представлен на рисунке 2. Данных о ЛЭП-0,4 имеют схожую структуру, поэтому разработка регулярных выражений была осуществлена по алгоритму для ТП.

На шаге 8 программа обладает полнотой первичной информации, все интересующие данные извлечены, поэтому начинается вычисление расчетных величин, таких как продолжительность отключения конкретного ТН, количества отключений объекта ЭСХ за все время, а также суммарная продолжительность отключения объекта ЭСХ.

На шаге 9 оператору предоставляются извлеченные и расчетные данные для последующего анализа и принятия решений.

В настоящее время большой популярностью при решении практических задач пользуются алгоритмы генеративного искусственного интеллекта (ГИИ) [7-9]. В связи с этим, в рамках данного исследования для программной реализации алгоритмов, приведенных на рис. 1-2 использованы инструменты ГИИ.

В целях настоящего исследования наиболее интересным является свойство GPT преобразовывать человеческих язык в язык программирования [8]. Эмпирическим путем было выяснено, что при применении моделей GPT возможно получить исполнительный кода, который при компиляции обратится в готовый программный продукт, выполняющий требующийся функции за 3-4 итерации.

В качестве платформы для создания программного обеспечения использована языковая модель искусственного интеллекта, разработанную компанией OpenAI на основе архитектуры GPT-4 (Generative Pre-trained Transformer 4), версию ChatGPT 4o. Зададим запрос в ChatGPT 4o на основании разработанного алгоритма с использованием метода регулярных выражений.

В результате на основе предложенного алгоритма было разработано программное обеспечение по извлечению полезных данных о ТН с применением метода регулярных выражений написанное на языке программирования Python 3. Пользовательский интерфейс программы и результат ее работы приведены на рисунках 3 и 4.

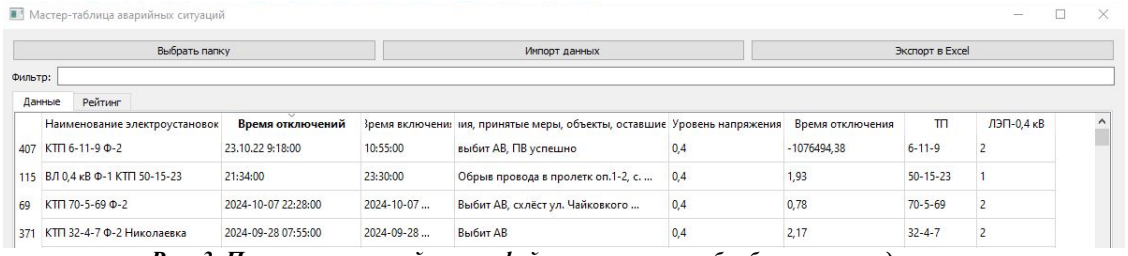


Рис. 3. Пользовательский интерфейс программы с обработанными данными

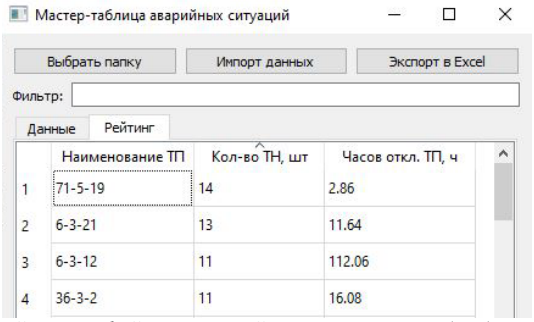


Рис. 4. Пользовательский интерфейс с простейшим анализом обработанной информации о ТН

Для оценки эффективности работы разработанного программного обеспечения по предложенному алгоритму рассчитаны метрики среднего времени обработки одной строки, используемой программой памяти и количества действий алгоритма. Полученные данные сведены в таблицу 1. Тестирование проводилась на 12 файлах электронных таблиц, то есть по 12 месяце или одному полному году. За пять тестов были обработаны данные наколенные в течение 5 лет.

Таблица 1

Результаты расчётов метрик при тестировании эффективности алгоритма

Тест №	Средне время обработки одной строки, с	Используемая память, МБ	Действий алгоритма, ед.
1	0,41	630	31342
2	0,42	633	30035
3	0,25	555	28793
4	0,62	556	27484
5	0,4	615	27456
В среднем:	0,42	597	29021,8

Оценка полноты извлечения данных из слабоструктурированной электронной таблицы произведена на основании следующего выражения [10]:

$$V_{извл.} = \frac{TP}{(TP+FN)} \bullet 100\%. \quad (1)$$

где $V_{извл.}$ – полнота извлечения, %; TP – Количество релевантных успешно извлечённых данных; FN – Количество релевантных неизвлеченных данных.

Тестирование проводилось на пяти случайно отобранных файлах из разных годов, затем из них подготавливалась контрольная выборка, то есть все релевантные данных, которые можно было извлечь из тестовых данных. После чего осуществлялось подсчёт правильно извлечённых релевантных строк и неизлеченных релевантных строк, которые было необходимо извлечь.

Таблица 2

Результат расчётов эффективности полноты извлечения данных

Тест №	Извлеченные строки, TP	Не извлеченные строки, FN	Полнота извлечения, $V_{извл.}$
1	66	7	90,41
2	22	2	91,67
3	22	1	95,65
4	81	6	93,10
5	73	0	100,00
В среднем:			94,17

В ходе анализа результатов теста из таблицы 2 видно, что в среднем показатель полноты извлекаемых релевантных данных составляет 94,17%. Отклонение в 5,83 % может быть вызвано сущностью слабоструктурированных данных. При проведении более тщательного анализа структуры исходных данных прогнозируется рост показателя полноты извлечения.

Заключение. В ходе проведенного исследования был разработан алгоритм по извлечению релевантной информации из слабоструктурированных данных. Сущность алгоритма заключается в предварительном анализе слабоструктурированных данных для установления позиционирования полезных данных и выявления закономерностей расположения полезной информации. Было предложено для извлечения шифров диспетчерского наименования подстанций и номеров фидеров использовать метод регулярных выражений. Представлен пример регулярных выражений.

На основании разработанного алгоритма и предложенного метода регулярных выражений с использованием генеративного искусственного интеллекта ChatGPT 4o было разработано ПО, выполняющие функции по извлечению на 94,17% релевантной информации из исходных слабоструктурированных данных.

Список литературы

1. Проблемы развития цифровой энергетики в России / Н. И. Воропай, М. В. Губко, С. П. Ковалев [и др.] // Проблемы управления. 2019. № 1. С. 2-14. DOI 10.25728/pu.2019.1.1. EDN PNDCJH.

2. Молокович О.А. Подходы к извлечению информации из слабоструктурированных данных // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. № 2(25). С. 64-66. EDN EJBILG.

3. Тюменцев Е.А. Алгоритм распознавания текстовых команд построения произвольной формы ввода данных / Е. А. Тюменцев, Т. В. Мелешенко // Математические структуры и моделирование. 2020. № 3(55). С. 103-116. DOI 10.24147/2222-8772.2020.3.103-116. EDN WNLQBA.

4. Коляда А.С. Извлечение информации из слабоструктурированных веб-страниц / А.С. Коляда, В.Д. Гогунский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 1, № 9(67). С. 51-54. EDN RUJXVJ.

5. Макарова Е.А. Обработка слабоструктурированных текстовых данных для использования в моделях анализа // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. № 1(29). С. 178-189. DOI 10.25729/ESI.2023.29.1.015. EDN HGPJOK.

6. Разумников С.В. Алгоритм и программное обеспечение для построения агрегированных рейтингов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. Т. 24, № 2. С. 39-44. DOI 10.21293/1818-0442-2021-24-2-39-44. EDN CVDEJC.

7. Кузовкова Т.А. Анализ перспектив развития искусственного интеллекта / Т. А. Кузовкова, М. М. Шаравова, Д. А. Катунин // Экономика и качество систем связи. 2024. № 1(31). С. 41-47. EDN YEYAKW.

8. Aditya Mogadala. Trends in Integration of Vision and Language Research: A Survey of Tasks, Datasets, and Methods / Aditya Mogadala, Marimuthu Kalimuthu, Dietrich Klakow // Journal of Artificial Intelligence Research. 2021. Vol. 71. DOI 10.1613/jair.1.11688.

9. Абдураманов З.Ш. Системы генеративного искусственного интеллекта для кодирования / З. Ш. Абдураманов, З. Д. Адживелиева, З. С. Сейдаметова // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 4. С. 246-249. EDN DHAFHZ.

10. Hossin M., Sulaiman M.N. A review on evaluation metrics for data classification evaluations. International journal of data mining & Knowledge management process, 2015, no. 5. P. 1-11. DOI:10.5121/ijdkp.2015.5201.

Сабельников Александр Сергеевич, аспирант, sabkvd@gmail.com, Россия, Барнаул, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,

Серебряков Николай Александрович, канд. техн. наук, доцент, na_serebryakov@altke.ru, Россия, Барнаул, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,

Хомутов Станислав Олегович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, khomutovso@altgtu.ru, Россия, Барнаул, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,

Андреева Елена Григорьевна, д-р техн. наук, профессор, lenandr02@yandex.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Парамонов Александр Михайлович, д-р техн. наук, профессор, amparamonov@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Кобенко Вадим Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

ALGORITHM AND METHOD FOR PROCESSING SEMI-STRUCTURED INFORMATION ON TECHNOLOGICAL VIOLATIONS IN ELECTRICAL NETWORKS WITH VOLTAGE 0,4…10 KV OF USING REGULAR EXPRESSIONS

A.S. Sabelnikov, N.A. Serebryakov, S.O. Khomutov, E.G. Andreeva, A.M. Paramonov, V.Yu. Kobenko, A.P. Naumenko

The results of a study on the development of an algorithm for extracting valuable information from semi-structured data contained in spreadsheets with inconsistent formatting are presented. An algorithm for extracting semi-structured data is proposed, which involves preliminary data analysis to determine the positioning of valuable data and identify patterns in their arrangement. Regular expressions were developed for extracting valuable data. The algorithm and method for extracting information about technological violations in electrical grid infrastructure objects using generative artificial intelligence tools, as well as its software implementation, have been realized. The obtained data hold practical significance for the planning of technical maintenance and major repairs.

Key words: technological violations, data extraction, semi-structured data, regular expressions, electrical energy transmission.

Sabelnikov Aleksandr Sergeyevich, postgraduate, sabkvd@gmail.com, Russia, Barnaul, Polzunov Altai State Technical University,

Serebryakov Nikolay Aleksandrovich, candidate of technical sciences, dotsent, na_serebryakov@altke.ru, Russia, Barnaul, Polzunov Altai State Technical University,

Khomutov Stanislav Olegovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, khomutovso@altgtu.ru, Russia, Barnaul, Polzunov Altai State Technical University,

Andreeva Elena Grigoryevna, doctor of technical sciences, professor, lenandr02@yandex.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Paramonov Aleksandr Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, amparamonov@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Kobenko Vadim Yuryevich, doctor of technical sciences, professor, kobra_vad@rambler.ru Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Naumenko Aleksandr Petrovich, doctor of technical sciences, professor, apnaumenko@omgtu.ru Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 004.032.26
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-257-258

ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЕМОВ ПРОДАЖ ТОРГОВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

С.В. Шабунин

В статье рассмотрены вопросы создания и верификации программного обеспечения, предназначенного для системы прогнозирования объемов продаж автомобильных аккумуляторных батарей торгующей организации. Показана возможность прогнозирования на основе искусственной нейронной сети. Испытания системы проведены по разработанной методике, предназначенной для оценки качества и точности работы представленных средств прогнозирования. Приведены результаты проверки автоматизируемых функций построения прогнозного графика.

Ключевые слова: верификация программного обеспечения, прогнозирование, методика испытаний, анализ данных.

Одной из важных задач проектирования систем прогнозирования объемов продаж автомобильных аккумуляторных батарей (ААБ) [1-3]. является обеспечение стабильности процесса продаж и оптимальное количество продукции на складах торгующей организации. Высокие требования к проектируемой системы обусловлены рисками, связанными с влиянием рыночных условий оптовой торговли и избыточными расходами на хранение продукции. Сложность разрабатываемого программного обеспечения (ПО) приводит к увеличению ошибок в нем, что приводит, что приводит к серьезным последствиям при эксплуатации ПО [4-5].

Основным подходом к обеспечению качества ПО для систем прогнозирования является верификация, которая включает проверку функциональности и соответствия установленным требованиям. Верификация охватывает как поиск ошибок в расчетах, так и анализ их причин, а также сопоставление прогнозов с реальными данными. Верификация программного кода важна для обеспечения корректности написания и точности численных алгоритмов. Проверка вычислений гарантирует качество вычислительной модели и позволяет выявить возможные численные ошибки. Системы прогнозирования обрабатывают большие объемы данных, включая объемы продаж ААБ, метеоданные и информацию о сезонных потребителях [6-10].

Верификация кода-оценочная деятельность обеспечивающая корректность написания программного кода, и чтобы численные алгоритмы давали точные решения. Верификация вычислений обеспечивает проверку качества вычислительной модели и выявление численных ошибок системы прогнозирования объемов продаж ААБ.

Системы прогнозирования обрабатывают большие объемы данных, которые включают в себя данные об объеме продаж ААБ, метеоданных и данных сезонных потребителей продукции.

Постановка задачи. Для успешной работы системы прогнозирования необходимо подтвердить ее соответствие установленным требованиям и провести процесс верификации. Верификационная проверка включает анализ возможных ошибок и оценку полученных результатов.

На начальном этапе верификации формируются требования к ПО, составляется методика испытаний, перечень реализуемых функций и решаемых задач. К требованиям к системе прогнозирования объемов продаж ААБ относятся:

Реализация импорта данных в формате CSV в базу данных системы.

Обучение модели прогнозирования с использованием алгоритмов искусственной нейронной сети (ИНС) на основе загруженных данных.

Расчет прогнозов с визуализацией данных в виде графиков и предоставлением информации в табличном формате. Для системы прогнозирования объемов продаж ААБ к системе предъявляются требования:

1.Реализация импорта данных в формате CSV (Comma-Separated Values) в базу данных системы.

2.Обучение модели прогнозирования с использованием алгоритмов искусственной нейронной сети (ИНС) на основе загруженных данных.

3.Расчет прогнозов. Система должна предоставить визуализацию данных прогнозирования в виде графика прогнозов и предоставлять данные прогноза в табличном виде.

Описание разрабатываемой системы. Для прогнозирования объемов продаж ААБ использовались данные от торговой фирмы «Николь», крупнейшего поставщика ААБ в Сибирском федеральном округе. Исходный массив данных включает объемы продаж, метеоданные и информацию о покупках сезонных потребителей.

Процесс прогнозирования состоит из следующих этапов:

1.Загрузка данных.

2.Обучение модели:

Применение скрипта для предобработки метеоданных.

Использование алгоритма обучения ИНС на подготовленных данных.

3.Расчет прогнозных значений: проверка стабильности и воспроизводимости результатов при использовании тех же данных.

4.Визуализация данных: построение графиков прогнозов.

5.Взаимодействие с пользователем: создание интерфейса для взаимодействия с системой и визуализации результатов.

Функциональная схема прогнозирования представлена на рис. 1. Пользователь, используя программный интерфейс, загружает данные (метеоданные, ретроспективные данные о продажах и информацию о сезонных покупках). Загруженные данные предобрабатываются: проверка на наличие пропусков (интерполяция) и выбросов (метод IQR), преобразование в формат Python для анализа и моделирования, а также определение значимых параметров (метод SHAP).

Создание модели прогнозирования на основе ИНС приводит к получению прогнозных значений объемов продаж ААБ.

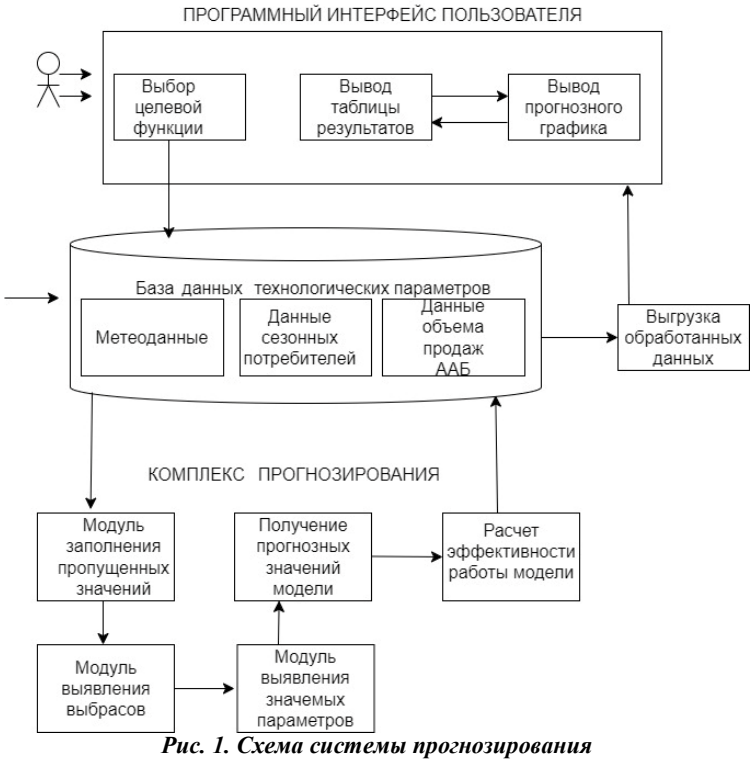


Рис. 1. Схема системы прогнозирования

Проведение экспериментов и верификации ПО. Проведена верификация разработанной системы на корректность работы функций прогнозирования объемов продаж ААБ с помощью процедуры проверки и методики испытаний модели. Составлены процедуры проверки работы системы и представлены результаты сверки полученных решений системы с результатами прогнозирования объемов продаж ААБ.

В проверяемой системе прогнозирования объемов продаж ААБ верификации подлежат как сама система, так и входящие в ее состав модули, участвующие в прогнозировании, обработки, хранении и анализе данных. В таблице 1 представлен состав программного обеспечения системы прогнозирования, для проведения верификации работы системы.

Таблица 1

Состав ПО системы прогнозирования объемов продаж ААБ

№,п/п	Наименование файла	Тип файла	Выполняемые функции
1	*Preprocessing.py*	Файл сценария / Python/	Предобработка исходных данных
2	*Normalization.py*	Файл сценария / Python/	Нормализация входных параметров
3	*Config.py*	Файл сценария / Python/	Хранение настраиваемых констант
4	*Model_forecast.ry*	Файл сценария / Python/	Обучение модели, создание прогноза, построение прогнозного графика
5	*Index.js*	Файл сценария / javaScript/	Запуск клиентской части приложения

В таблице представлены основные характеристики построенного ПО системы прогнозирования, на языке Python. ПО имеет модульную структуру, в которой каждый элемент выполняет набор функций для обеспечения эффективной работы системы.

В таблице 2 представлены процедуры верификации разработанной системы, включая предъявляемые требования, ожидаемые результаты и критерии оценки корректности работы системы и её компонентов. Этот подход охватывает всю систему, включая алгоритмы обучения и прогнозирования, возможности импорта данных в базу и клиентскую часть приложения.

Для каждой процедуры проверки определена методика испытаний, которая включает следующие этапы:

Подготовка тестовых данных: На этом этапе разрабатываются наборы данных, которые отражают реальные сценарии использования системы. Тестовые данные должны включать как стандартные, так и крайние случаи, чтобы полностью оценить функциональность. Тесты проводятся в контролируемой среде, где все условия воспроизводимы. Каждый тест фиксирует результаты выполнения, что позволяет детально анализировать поведение системы. После завершения тестирования результаты сравниваются с ожидаемыми значениями. Критерии оценки включают как функциональные требования (например, точность прогнозов), так и нефункциональные характеристики (такие как производительность системы и обработка ошибок).

Таким образом, верификация системы не только обеспечивает соответствие функциональным требованиям, но и гарантирует надёжность и стабильность работы приложения в различных условиях. Этот комплексный подход позволяет выявить потенциальные проблемы на ранних этапах, что значительно снижает риски в процессе эксплуатации системы.Для обучения модели используется набор данных полученный от торговой фирмы «Николь» крупнейшего поставщика автомобильных аккумуляторных батарей в Сибирском федеральном округе и представленные массивом, состоящих из объемов продаж аккумуляторных батарей (Омская обл.) за период 01.09.2021 по 01.12.2023 и представлен в виде файла в формате CSV, с ограничением времени обучения. Производится сравнение прогнозных значений объемов продаж ААБ с фактическими. Далее произведена процедура проверки корректности системы на основании процедур из таблицы 2. Результаты построения графика Результаты построения графика демонстрируют полное соответствие заявленным требованиям оценки.

Таблица 2

Процедура проверки и методика испытаний ПО

Процедура проверки	Методика испытаний	Критерий оценки/ожидаемый результат
1.1 Проверка импорта данных в базу данных системы	Проверить работоспособность подсистемы импорта данных и внесение в базу данных а) выбрать путь к файлу формата *csv*; б) проверить совпадение формата; в)загрузить данные в систему	При совпадении формата (шаг б) загрузка данных в базу данных (шаг в). При несовпадении формата-оповещение пользователю о невозможности загрузить файл.
1.2 Проверка возможности подсистемы коррекции значимых параметров	Проверить систему на правильное выполнение алгоритма коррекции значимых параметров а) ввести значения значимых параметров на вход системы б) контролировать выполнение процедуры проверки условия необходимости коррекции на экране монитора в) проверить выполнение коррекции параметров в отладочном окне программы;	Коррекция значимых параметров на заданный коэффициент.
1.3 Проверка алгоритмов обучения и прогнозирования. Верификация корректности графиков прогнозов	1. Подготовка данных для тестирования: а) подготовить тестовый набор данных, который включает в себя разнообразные сценарии использования системы, включая граничные значения и типичные случаи использования; б) загрузить тестовые данные в систему; в) запустить процесс обучения модели с использованием тестовых данных; г) оценить время, затраченное на обучение и использование ресурсов системы. 2. Тестирование алгоритма прогнозирования: а) Используя обученную модель, выполнить прогнозирование на другом наборе тестовых данных, который не использовался при обучении; б) записать результаты прогноза 3. Проверка корректности графиков прогноза: а) используя результаты прогноза построить графики; б) с помощью скриптов проверить, что график корректно отображает график прогноза;	1. Критерии оценки для обучения модели: а) модель должна обучаться в пределах установленного времени; б) ресурсы системы используются без перегрузок; в) ошибка прогнозирования должна соответствовать заданным требованиям (не выше 5%) 2. Критерии оценки для прогнозирования: а) время выполнения прогноза не должно превышать установленные лимиты; б) результаты прогноза должны быть стабильны и воспроизводимы при повторном использовании тех же данных. 3. Критерии оценки для графиков прогноза: а) графики должны точно отображать данные прогноза; б) графики должны соответствовать стандартам отображения: правильное использование цветов, метод, легенд и т.д. в) ошибки в графиках (неверные значения или

	в) проверить, соответствуют ли графики установленным требованиям отображения и точности данных.	перекрывающиеся линии) не допускаются.
1.4 Проверка корректного чтения и использования констант из файла конфигурации	1. Проверка наличия файла конфигурации и его доступности. 2. Проверка корректности формата конфигурации. 3. Тестирование чтения констант из файла конфигурации. 4. Проверка правильности использование констант в основном коде программы. 5. Проверка обработки ошибок при отсутствии файла конфигурации или некорректном формате.	1. Файл конфигурации должен существовать и быть доступным для чтения. 2. Формат файла конфигурации должен быть корректным. 3. Константы должны успешно читаться из файла конфигурации и использоваться в программе. 4. При изменении констант в файле конфигурации изменения должны отражаться в поведении программы без необходимости изменения кода. 5. Обработка ошибок должна быть реализована таким образом, чтобы программа продолжала работать при возникновении проблем с файлом конфигурации.
1.5 Проверка успешного запуска клиентской части приложения. Проверка корректности отображения интерфейсов.	1. Запуск клиентской части приложения с помощью файла *Index.js*. 2. Проверка корректности отображения всех элементов пользовательского интерфейса. 3. Проверка корректности работы интерактивных элементов: отправка форм, обработка кликов по кнопкам, обновление данных без перезагрузки страницы. 4. Проверка интерактивности интерфейса: проверка корректного отображения на различных устройствах и разрешения экранов. 5. Проверка работы ошибок: загрузка страницы при наличии ошибок в коде, обработки ошибок ввода данных.	1. Клиентская часть приложения должна успешно запускаться с помощью файла *Index.js*. 2. Весь пользовательский интерфейс должен отображаться корректно. 3. Все интерактивные элементы должны работать согласно ожидаемому поведению. 4. При возникновении ошибок приложение должно корректно обрабатывать их и сообщать об этом пользователю.

На рисунке 2 представлен интерфейс программы с результатами прогнозирования объемов продаж и сравнение с фактическими. Интерфейс программы выполнен в минималистическом стиле и позволяет использовать загрузку данных в формате CSV.

Загрузить файл

Data	$V_{руб}$, руб	T_A	V_W	φ
01.09.2023	415 219,40	34	1	98
02.09.2023	82 309,81	25	12	95
03.09.2023	196 068,63	28	6	94
04.09.2023	209 155,92	29	5	94
05.09.2023	88 259,44	23	10	90
06.09.2023	29 530,00	20	4	90

Рис. 2. Графический интерфейс ПО

В результате получена гистограмма, представлена на рис. 3, показывающая точность прогнозной модели.

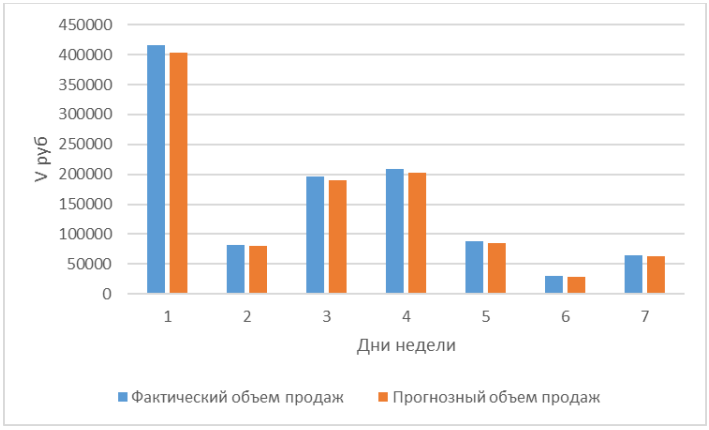


Рис. 3. Прогнозирования объемов продаж автомобильных аккумуляторных батарей

Средняя ошибка прогнозирования составила ε_n =4%, это обусловлено тем что в преддверии повышения спроса на аккумуляторные батареи (понижение температуры окружающей среды) торгующая организация проводила искусственную стимуляцию продаж за счет предоставления своим покупателям дополнительных скидок и отсрочек платежа за повышенный объем покупки продукции. Отсутствие данного фактора снизило бы ошибку до ε_n =2,54%.

Проверенные функции показали, что предложенная методика испытаний позволяет эффективно оценивать качество и функциональность ПО для системы прогнозирования. Разработанная методика испытаний позволила провести комплексную верификацию системы и подтвердить ее соответствие заданным параметрам.

Заключение. В результате проведенного исследования была разработана методика испытаний системы прогнозирования объемов продаж ААБ на основе искусственной нейронной сети, которая позволила проверить и подтвердить эффективность полученных результатов. Эта методика обеспечила верификацию программного обеспечения и подтвердила его соответствие установленным требованиям. Результаты испытаний показали, что модель прогнозирования демонстрирует высокую точность, что подтверждает ее практическую применимость и надежность.

Список литературы

1. Васильев А.А. Методы и модели прогнозирования объема продаж в маркетинге // Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки. 2021. № 2. С. 213–216.
2. Reynolds C.F. A Distributed Behavioral Model / C.F Reynolds, Herds, and Schools // Computer Graphics. 1987. Vol. 21. no. 4. P. 25–34.
3. Гратинский В.А., Новиков Е.М., Захаров И.С. Экспертная оценка результатов верификации инструментов верификации моделей программ // Труды ИСП РАН. 2020. Т.32, № 5. С. 7-20.
4. Kennedy J. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R.C. Eberhart // International Conference on Neural Networks (ICNN'95). Perth, WA, Australia. 1995. P. 1942–1948.
5. Shi Y. A modified particle swarm optimizer / Y. Shi, R. Eberhart // IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, AK, USA. 1998. P. 69–73.
6. Анушина Е.С. Прогнозирование временных рядов на основе интеллектуальных вычислительных технологий // Информатика и системы управления. 2009. №1(19). С. 84-90.
7. Pham D.T. The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems / D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri , S. Rahim, M. Zaidi. 2005. 40 p.
8. Soman S.S., Zareipour H., Malik O., Mandal P. A review of wind power and wind speed forecasting methods with different time horizons // North American Power Symposium. 2010.
9. Denisova L.A. A mathematical model of a digital control system with variable parameters // Automation and Remote Control. 2012. Vol. 73 (11). P. 1895–1901.
10. Денисова Л.А. Математическая модель цифровой системы регулирования с переменными параметрами // Автоматизация в промышленности. 2011. №9. С. 45–48.

Шабунин Сергей Владимирович, аспирант, AgranomMotor@yandex.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

VERIFICATION OF SOFTWARE FOR THE SYSTEM OF FORECASTING SALES VOLUMES OF A TRADE ORGANIZATION

S.V. Shabunin

The article considers the issues of creation and verification of software intended for the system of forecasting sales volumes of automobile batteries of a trading organization. The possibility of forecasting based on an artificial neural network is shown. The system was tested according to the developed methodology intended to assess the quality and accuracy of the presented forecasting tools. The results of checking the automated functions of constructing a forecast schedule are presented.

Key words: software verification, forecasting, testing methodology, data analysis.

Shabunin Sergey Vladimirovich, postgraduate, AgranomMotor@yandex.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 004.032.26
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-261-262

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ РЕСУРСОСНАБЖАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.В. Блохин

В статье рассмотрены вопросы разработки и верификации системы краткосрочного прогнозирования электропотребления для ресурсоснабжающего предприятия. Система использует ретроспективные данные об электропотреблении предприятием и позволяет прогнозировать потребление на основе заданной пользователем даты, дня недели и праздничного статуса. В статье также рассмотрены методики и результаты верификации программного обеспечения, подтверждающие корректность и стабильность работы системы.

Ключевые слова: электропотребление, краткосрочный прогноз, машинное обучение, верификация программного обеспечения, анализ данных, тестирование программного обеспечения

В условиях современных энергосистем одной из ключевых задач является обеспечение стабильности распределения и потребления электроэнергии. Особенно это актуально для участников Оптового рынка электрической энергии и мощности (ОРЭМ) [1-5]. ОРЭМ представляет собой рынок, на котором заключаются сделки по купле-продаже электрической энергии и мощности в рамках контрактов, заключенных между производителями, потребителями и посредниками [6-8]. Участники ОРЭМ обязаны предоставлять точные прогнозы по объёмам электропотребления, поскольку это напрямую влияет на баланс между генерацией и потреблением, а также на установление справедливых тарифов [9].

Нарушения в прогнозировании электропотребления могут привести к негативным последствиям для всей энергосистемы: перегрузкам сети, дисбалансу между производством и потреблением, и даже к аварийным ситуациям [10-13]. Кроме того, точные прогнозы необходимы для расчета резервов мощности, снижения операционных затрат

и повышения экономической эффективности работы энергосистем. Для энергосбытовых и ресурсоснабжающих компаний точность прогнозов является критически важным фактором, так как это напрямую влияет на их конкурентоспособность на ОРЭМ [14].

Краткосрочные прогнозы электропотребления особенно важны для планирования работы энергосистемы в ближайшие сутки. На ОРЭМ оперативные прогнозы позволяют участникам заранее планировать закупку или продажу электроэнергии, минимизируя риски превышения планов и связанные с этим штрафы. Точные прогнозы также помогают избежать излишних резервов мощности и перегрузок сети, что улучшает качество и надёжность энергоснабжения [15].

Эффективные методы краткосрочного прогнозирования могут также существенно снизить затраты на компенсацию потерь электроэнергии в сетях, что делает их критически важными для эффективного функционирования ОРЭМ. В условиях динамично меняющихся факторов, таких как погодные условия, выходные и праздничные дни, использование исторических данных и современных методов машинного обучения становится обязательным элементом процесса прогнозирования [16].

Для обеспечения качества и надёжности программного обеспечения (ПО), предназначенного для прогнозирования электропотребления, критически важна верификация разработанных решений. Верификация – это процесс систематической проверки того, что программный продукт соответствует заданным требованиям и спецификациям. Основные задачи верификации включают подтверждение правильности выполнения расчетов, достоверности прогнозов и соответствия реальным данным [17].

Существует несколько методов верификации программного обеспечения:

– *тестирование модулей:* на этапе разработки ПО проверяются отдельные компоненты программы (модули) на соответствие их функциональным спецификациям. Для систем прогнозирования, это может включать проверку алгоритмов обработки данных, построения прогнозов и визуализации результатов;

– *интеграционное тестирование:* проводится проверка взаимодействия между различными модулями системы. Это важно для прогнозных систем, где взаимодействуют компоненты сбора данных, обработки и обучения моделей, и интерфейсы отображения прогнозов;

– *функциональное тестирование:* проверяется выполнение программой её ключевых функций, таких как сбор данных, обучение модели и построение графиков прогнозов. Здесь тестируются возможности взаимодействия пользователя с системой и корректность формирования итоговых прогнозов;

– *нефункциональное тестирование:* анализируются характеристики ПО, не связанные напрямую с функциональностью, такие как производительность, надёжность и безопасность. Для систем прогнозирования важно, чтобы ПО стабильно функционировало даже при больших объёмах данных, а также обеспечивало защиту данных от несанкционированного доступа [18].

Верификация программы для прогнозирования электропотребления требует комплексного подхода, включающего тестирование точности прогноза на различных временных отрезках и с разными условиями. Важно оценивать работу программы при прогнозировании для обычных и праздничных дней, когда структура потребления электроэнергии может значительно различаться. Также проверяется корректность обработки входных данных, их предобработки и последующего использования для обучения моделей [17].

Таким образом, точная верификация программных решений позволяет гарантировать их соответствие требованиям участников ОРЭМ, обеспечивая надёжные и точные прогнозы электропотребления, необходимые для эффективного функционирования энергосистемы.

Этапы разработки. Для разработки программного обеспечения, предназначенного для краткосрочного прогнозирования электропотребления на ресурсоснабжающем предприятии, требуется обеспечить его соответствие функциональным и техническим требованиям, установленным для подобных систем. Основной задачей является создание программы, которая на основе ретроспективных данных об электропотреблении сможет эффективно прогнозировать потребление электроэнергии на заданную дату с учётом дня недели и праздничных дней.

Процесс разработки включает в себя следующие основные этапы:

1. сбор и предобработка данных: программа должна корректно загружать данные об электропотреблении из файлов Excel, выделять необходимые временные признаки (год, месяц, день, час, день недели) и учитывать праздничные дни согласно производственному календарю РФ. Важной задачей является подготовка данных для прогнозирования, включая расчёт средних значений потребления за предыдущие периоды и выявление выбросов в данных при помощи метода IQR (межквартильного интервала);

2. обучение модели прогнозирования: для построения прогноза система использует модель машинного обучения XGBoost. Эта модель должна быть обучена на основе ретроспективных данных об электропотреблении и должна учитывать временные параметры, такие как день недели, праздники, фактор последних известных 72 значений электропотребления и фактор возможной нештатной работы оборудования на предприятии. Необходимо обеспечить возможность гибкой настройки модели через подбор гиперпараметров для достижения наилучших результатов прогнозирования;

3. построение прогноза и визуализация: программа должна формировать прогноз потребления электроэнергии на 24 часа на заданную дату. Результаты прогнозов должны быть отображены в графическом виде с указанием прогнозных значений, а также доверительных интервалов, что позволит пользователю визуально оценить возможные отклонения. Графики должны быть интуитивно понятными и точно отражать прогнозируемые значения;

4. сохранение результатов: программа должна сохранять прогнозные значения в формате Excel для дальнейшего анализа и возможного использования в других системах. Это необходимо для документирования результатов и интеграции с внешними системами управления энергоснабжением.

Задачей верификации программного обеспечения является проверка его работоспособности в реальных условиях, включая тестирование на разных наборах данных. Важно, чтобы программа демонстрировала высокую точность прогноза и стабильность работы при различных сценариях использования, таких как прогнозирование в выходные и праздничные дни.

Описание разрабатываемой системы. Разрабатываемая система для краткосрочного прогнозирования электропотребления представляет собой программное обеспечение, которое использует ретроспективные данные об электропотреблении для построения прогнозов. Основным источником данных является автоматизированная ин-

формационно-измерительная система контроля и учёта электроэнергии (АИИС КУЭ). Программа также учитывает особенности производственного календаря Российской Федерации, такие как выходные и праздничные дни, которые влияют на потребление электроэнергии.

Архитектура системы. Программное обеспечение построено на основе языка Python и использует такие библиотеки, как Pandas для обработки данных, XGBoost для машинного обучения, Matplotlib для визуализации прогнозов, и tkinter для создания пользовательского интерфейса. Система обладает интуитивно понятным интерфейсом, который позволяет пользователю загружать данные, устанавливать дату прогноза, задавать параметры (день недели, является ли дата праздничной), и выводить результаты прогноза в графическом и табличном виде.

Основные компоненты системы

1. Интерфейс пользователя: пользовательский интерфейс реализован с использованием библиотеки tkinter. Он предоставляет пользователю следующие возможности:

– загрузка данных из файла Excel с ретроспективными данными об электропотреблении;

– выбор даты прогнозирования и указание характеристик дня (будний/выходной/праздничный);

– отображение результатов прогнозирования в графическом виде и вывод прогнозных значений.

2. Модуль предобработки данных: отвечает за извлечение данных из загруженного файла и их подготовку для обучения модели. Программа извлекает временные параметры (год, месяц, день, час, день недели) из колонки с временными метками, а также учитывает, является ли день праздничным на основе предварительно заданного списка праздничных дней в Российской Федерации, также производиться поиск и удаление выбросов (методом межквартильного интервала), обнаружение и заполнение пробелов в данных. Помимо этого, вычисляются и добавляются новые признаки, такие как фактор предыдущих 72 часов и признак возникновения нештатных ситуаций в работе оборудования на предприятии.

3. Модель машинного обучения: программа использует алгоритм XGBoost для прогнозирования электропотребления. Эта модель была выбрана за её высокую эффективность в задачах работы с временными рядами и хорошую способность обрабатывать большие объёмы данных. Обучение модели происходит на исторических данных, с учётом таких параметров, как день недели, наличие праздничных дней, а также среднее потребление за предыдущие 72 часа и фактор возможной нештатной работы оборудования на предприятии. Для настройки модели программа применяет метод подбора гиперпараметров (GridSearchCV), что позволяет найти оптимальные параметры для XGBoost, такие как глубина деревьев, скорость обучения и количество деревьев в ансамбле.

4. Прогнозирование: программа генерирует прогнозы потребления на 24 часа на основе обученной модели. Для каждого часа рассчитывается прогнозное значение электропотребления, а также доверительные границы (95%-ый доверительный интервал), что позволяет учесть возможные отклонения от прогноза.

5. Визуализация: программа строит график, отображающий прогнозное потребление за выбранные сутки. График включает прогнозные значения и доверительные интервалы. Интерфейс предоставляет возможность взаимодействия с графиком, позволяя пользователю более детально анализировать данные.

6. Сохранение данных: все прогнозные значения сохраняются в файл формата Excel для дальнейшего анализа или интеграции с другими системами. Сохранение данных включает прогнозное потребление, верхнюю и нижнюю границы доверительного интервала для каждого часа прогнозируемого дня.

На рис. 1 представлена схема системы краткосрочного прогнозирования электропотребления предприятием.

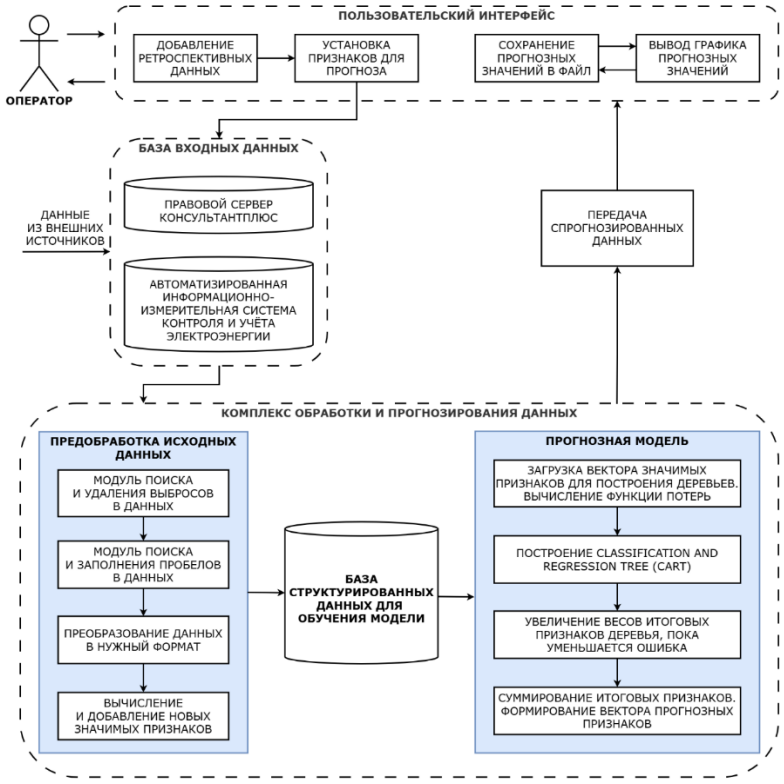


Рис. 1. Схема системы прогнозирования

Взаимодействие с пользователем

1. Оператор загружает файл с историческими данными об электропотреблении.

2. Оператор вводит дату прогноза (например, 2024-10-25), выбирает день недели, при необходимости, указывает, что это праздничный день.

3. Программа обрабатывает данные, обучает модель на ретроспективных данных, и строит прогноз потребления на указанный день.

4. В результате оператор получает график с прогнозом и доверительными интервалами, а также сохраненный файл с результатами в формате Excel.

Проводимые эксперименты для верификации программного обеспечения. Верификация включала как модульное, так и интеграционное тестирование всех компонентов системы, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Состав программного обеспечения системы прогнозирования

№ п/п	Наименование файла	Тип файла	Выполняемые функции
1	Prediction.exe	Исполняемый файл	Запуск интерфейса пользователя, настройка параметров для прогнозирования и вызов функций обработки данных.
2	data_loader.py	Файл сценария на языке программирования Python	Загрузка данных из файлов Excel, предобработка данных, создание временных признаков.
3	model_forecast.py		Обучение модели XGBoost, настройка гиперпараметров, генерация прогнозных значений для указанного периода.
4	visualization.py		Построение графиков прогнозного потребления и отображение доверительных интервалов.
5	config.py	Файл конфигурации	Хранение постоянных параметров, таких как список праздничных дней и параметры гиперпараметров.
6	interface.py	Файл сценария на языке программирования Python, содержащий tkinter	Реализация графического интерфейса, взаимодействие с пользователем, выбор даты и характеристик прогноза.
7	requirements.txt	Текстовый файл	Список зависимостей для установки необходимых библиотек (Pandas, XGBoost, tkinter и т.д.).
8	future_predictions.xlsx	Файл Excel	Выходной файл для хранения прогнозных значений электропотребления и доверительных интервалов.

Для верификации программного обеспечения были проведены испытания, направленные на оценку точности прогнозирования, стабильности работы программы и соответствия функциональным требованиям.

В табл. 1 представлены основные компоненты программного обеспечения и их функции, обеспечивающие выполнение задач по сбору данных, прогнозированию и визуализации результатов.

Методика испытаний представлена в табл. 2 и включает следующие этапы:

1. подготовка тестовых данных:

– были отобраны ретроспективные данные об электропотреблении, содержащие различные временные интервалы (будни, выходные и праздничные дни).

– для тестирования использовались данные, соответствующие типичным и пиковым периодам потребления, чтобы оценить поведение программы в различных сценариях.

2. тестирование работы алгоритмов прогнозирования:

– выполнено тестирование процесса предобработки данных: проверена корректность выделения временных признаков, включая учёт праздничных дней и расчёт средних значений за предыдущие 72 часа.

– алгоритмы прогнозирования тестировались на корректность формирования прогнозного графика потребления. Прогнозы были выполнены на основании исторических данных и проверены на воспроизводимость.

3. проверка точности модели:

– оценка точности прогнозирования проводилась на основе расчёта средней абсолютной ошибки (MAE) и средней абсолютной процентной ошибки (MAPE). Критерии оценки включали среднюю ошибку, не превышающую 5%.

– были проведены сравнительные эксперименты на различных наборах гиперпараметров, чтобы определить оптимальные значения для модели XGBoost.

4. функциональное тестирование:

– проверены ключевые функции системы: загрузка данных, выбор даты прогноза, построение графика прогнозов и сохранение результатов в файл.

– проведена проверка взаимодействия с интерфейсом, включая корректное отображение графиков и возможность выбора параметров прогноза (выходной или праздничный день).

5. нефункциональное тестирование:

– выполнено тестирование производительности при обработке больших объёмов данных и высокочастотных запросах к системе. Программа продемонстрировала стабильность работы и корректное выполнение всех задач в установленные временные рамки.

– проведено тестирование на обработку ошибок: проверена корректная работа программы при отсутствии данных или ошибках в загружаемых файлах.

Эксперименты проводились с различными сценариями использования, чтобы подтвердить надёжность и точность работы модели в условиях реальных данных. Результаты данных экспериментов представлены в табл. 2.

Тестирование компонентов системы для оценки их соответствия предъявляемым требования прошло успешно. Все компоненты системы прогнозирования достигли ожидаемого результата.

Фрагмент результатов тестирования, демонстрирующий, что разработанное программное обеспечение соответствует критериям точности, устойчивости и функциональности, заявленным для системы прогнозирования представлен в табл. 3.

Таблица 2

Процедуры проверки и методика испытаний программного обеспечения

№ п/п	Процедура проверки	Методика испытаний	Критерий оценки/ожидаемый результат
1.1	Проверка корректности загрузки и предобработки данных	1. Загрузка данных из тестового файла Excel. 2. Проверка корректности выделения временных признаков (год, месяц, день, час, день недели). 3. Проверка учёта праздничных дней. 4. Проверка расчёта и добавления значимых признаков.	Данные должны быть загружены без ошибок, временные признаки и праздничные дни корректно определены, факторы последних 72 часов и возможности возникновения нештатных ситуаций должны быть добавлены в обучающую выборку.
1.2	Проверка корректности работы алгоритмов обучения и прогнозирования	1. Подготовка тестового набора данных и выполнение прогноза на заданный день. 2. Сравнение прогнозных значений на тестовом наборе данных (неиспользуемых в обучении модели) и с реальными данными. 3. Оценка точности прогноза с использованием MAE и MAPE.	Средняя ошибка прогноза (MAPE) не должна превышать 5%. Прогноз должен быть точен и воспроизводим при повторных расчётах.
1.3	Проверка построения графика и доверительных интервалов	1. Построение графика прогнозного потребления на основе тестовых данных. 2. Проверка отображения доверительных интервалов. 3. Визуальная проверка корректности отображения осей, подписей и единиц измерения.	Графики должны корректно отображать прогноз и доверительные интервалы, соблюдая точность и стандарты визуализации.
1.4	Проверка функциональности интерфейса пользователя	1. Запуск программы и выполнение всех возможных действий интерфейса (загрузка данных, выбор даты, запуск прогнозирования). 2. Проверка работы кнопок и выпадающих списков, отображения сообщений об ошибках.	Все элементы интерфейса должны работать без сбоев. Ошибки в действиях пользователя должны корректно обрабатываться.
1.5	Проверка сохранения прогнозных данных в файл Excel	1. Выполнение прогнозирования и сохранение результатов в файл future_predictions.xlsx. 2. Проверка структуры и корректности данных в выходном файле (даты, прогнозные значения, доверительные границы).	Прогнозные значения и доверительные интервалы должны корректно сохраняться в файл Excel в нужном формате.
1.6	Нефункциональное тестирование: производительность	1. Загрузка большого объёма данных и выполнение прогнозирования. 2. Оценка времени выполнения операций и стабильности работы программы.	Время выполнения прогноза должно быть приемлемым (не более 5 минут). Программа должна работать стабильно.
1.7	Проверка обработки ошибок	1. Загрузка файла с некорректной структурой данных и проверка реакции программы. 2. Ввод неверных параметров для прогноза и проверка сообщения об ошибке.	Программа должна корректно обрабатывать ошибки и предоставлять пользователю сообщения с описанием проблемы.

Таблица 3

Фрагмент результатов тестирования программного обеспечения

№ п/п	Входные данные	Критерий оценки	Фактический результат
1.1	Набор данных об электропотреблении за 3 и более года	Модель должна обучаться в пределах установленного времени (не более 5 минут).	Время обучения модели составило 1 минуту 19 секунд, что соответствует критериям. См. рис. 2.
1.2	Прогнозные значения на заданный день, отметки времени в сутках, значения границ доверительного интервала	Программа должна корректно отображать графики прогнозных значений, доверительного интервала и момента времени. При отображении графика должны соблюдаться: использование правильной цветовой палитры, легенд, надписей и т.п.	Программа отобразила в пользовательском интерфейсе график прогнозных значений, доверительный интервал. Легенда и все надписи верны и читаемы. См. рис. 3.
1.3	Сохранение прогнозных значений в Excel	Результаты прогнозирования должны корректно сохраняться в файл future_predictions.xlsx.	Программа отразила информационное сообщение о сохранении файла прогнозных значений. Прогнозные значения успешно сохранены в формате Excel, файл содержит все необходимые данные: даты, значения и интервалы. См. рис. 3

На рис. 2 представлен фрагмент полученных результатов выполнения программы по обучению модели краткосрочного прогнозирования электропотребления, а именно:

– параметры модели: отображены оптимальные параметры модели XGBoost для прогноза на будущий и выходной день, включая learning_rate, max_depth, и n_estimators;

– предупреждения (FutureWarning): присутствуют уведомления о будущих изменениях в библиотеке pandas и возможных проблемах с типами данных, указывающие на необходимость обновления кода для обеспечения его совместимости с новыми версиями библиотеки;

– диапазон данных: программа создала временной ряд данных с интервалом в час на определённую дату (начиная с 31 октября 2024 года) для прогнозирования потребления электроэнергии;

– сохранение результатов: прогнозные значения сохранены в файл future_predictions.xlsx, что подтверждается сообщением в консоли;

– время выполнения программы составило 1 минуту 19 секунд, что также указано в выводе.

На рисунке 3 представлен пользовательский интерфейс разработанного ПО для краткосрочного прогнозирования электропотребления.

Пользовательский интерфейс включает в себя возможность выбора даты прогноза, дня недели и статуса праздничного дня. Также имеется кнопка «Сделать прогноз» для выполнения расчета потребления электроэнергии.

На графике отображены прогнозные значения потребления электроэнергии на выбранный период, а также доверительный интервал, обозначенный синим цветом. Точками на графике показаны значения прогноза по часам, что помогает оценить изменение потребления в течение дня.

ПО сохраняет прогнозные данные в файл future_predictions.xlsx. В Excel-файле содержатся столбцы с датой и временем, прогнозным значением потребления, а также верхней и нижней границей доверительного интервала. Также предусмотрено отображение сообщения об успешном сохранении результатов прогноза в Excel-файле, что подтверждает корректное завершение процесса прогнозирования.

```
Наилучшие параметры для буднего дня: {'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 3, 'n_estimators': 100}
Наилучшие параметры для выходного дня: {'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 3, 'n_estimators': 200}
Прогнозные значения сохранены в файл future_predictions.xlsx
<ipython-input-3-07ec8d416c7d>:78: FutureWarning: 'H' is deprecated and will be removed in a future version, please us
  'Дата/Время': pd.date_range(start='2024-10-31', periods=24, freq='H'),
<ipython-input-3-07ec8d416c7d>:83: FutureWarning: Setting an item of incompatible dtype is deprecated and will raise a
 14070.461 14150.752 14442.698 14428.546 14428.546 14428.546 14362.713
 14362.713 14342.269 14342.269 14310.535 14369.293 14645.273 14377.972
 13721.951 13393.839 13006.304]' has dtype incompatible with int64, please explicitly cast to a compatible dtype first
  future_predictions_df.loc[future_data['День недели'] < 5, 'Прогнозное потребление'] = future_predictions_weekday
```

✓ 1 мин. 14 сек. выполнено в 15:51

Рис. 2. Фрагмент консольного вывода результатов выполнения программы по обучению модели краткосрочного прогнозирования электропотребления

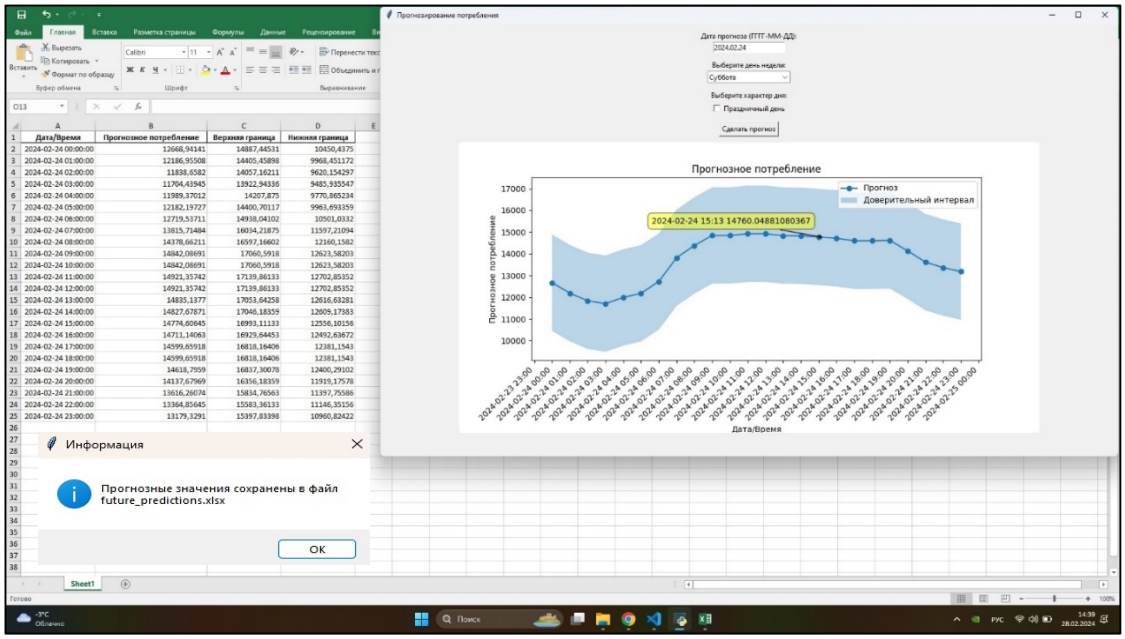


Рис. 3. Результат работы программного обеспечения краткосрочного прогнозирования электропотребления

Заключение. В результате проведённого исследования разработано программное обеспечение системы краткосрочного прогнозирования электропотребления для городского ресурсоснабжающего предприятия. Система использует ретроспективные данные об электропотреблении, полученные из автоматизированной информационно-измерительной системы контроля и учёта электроэнергии, и учитывает такие параметры, как выбранная дата прогноза, день недели и праздничные дни по производственному календарю РФ, параметр последних известных данных за 72 часа и возникновения нештатных ситуаций в работе оборудования на предприятии. Основным компонентом системы является модель машинного обучения на основе ансамбля деревьев решений, позволяющая производить краткосрочные прогнозы потребляемой электроэнергии с учётом специфики рабочих, выходных, праздничных дней и других значимых признаков. Результаты прогнозирования визуализируются в виде графиков с указанием доверительных интервалов, что повышает удобство восприятия и анализа данных пользователем.

Отметим, что процесс верификации программного обеспечения включал тестирование основных компонентов системы, таких как загрузка данных, корректность работы алгоритмов обучения и работы модели прогнозирования, отображение графиков и сохранение результатов в формате Excel. Эксперименты подтвердили высокую точность и стабильность работы модели, что соответствует установленным критериям.

Предлагаемое ПО имеет потенциал для практического применения на предприятиях энергетической отрасли, так как позволяет повысить точность планирования и сократить расходы на закупки электроэнергии на оптовом рынке.

Список литературы

1. Блохин А.В. Влияние временных и климатических факторов на потребление электроэнергии / А.В. Блохин, А.С. Грицай, А.Ю. Горшенин, А.Ф. Пелипенко // Информационные технологии в науке и производстве : Материалы IX Всероссийской молодежной научно-технической конференции. Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С. 42-50.

2. Блохин А.В. Прогнозирование потребления электроэнергии городского ресурсоснабжающего предпприятия / А.В. Блохин, А.С. Грицай // Фёдоровские чтения 2023: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (с элементами научной школы для молодежи). Москва: Национальный исследовательский университет "МЭИ", 2023. С. 144-149.

3. Блохин А.В. Анализ факторов, влияющих на потребление электроэнергии городского ресурсоснабжающего предприятия / А.В. Блохин, А.С. Грицай, В.И. Потапов, О.П. Шафеева // Математические структуры и моделирование. 2023. № 3(67). С. 23-35. DOI 10.24147/2222-8772.2023.3.23-35.

4. Серебряков Н.А. Применение адаптивного ансамблевого нейросетевого метода для краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса районных электрических сетей // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 39–45.

5. Блохин А.В. Исследование факторов, влияющих на потребление электроэнергии коммерческим предприятием / А.В. Блохин, А.С. Грицай, А.Ю. Горшенин // Математические структуры и моделирование. 2022. № 3 (63). С. 39–47. DOI: 10.24147/2222-8772.2022.3.39-47.

6. Горшенин А.Ю. Предварительная обработка данных в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления / А.Ю. Горшенин, А.С. Грицай, Л.А. Денисова // Фёдоровские чтения 2023 : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (с элементами науч. шк. для молодежи) / Нац. исслед. ун-т «МЭИ». Москва: Изд-во МЭИ, 2023. С. 96–104.

7. Король А.В. Сравнение адаптивных методов краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями / А.В. Король, А.С. Грицай, А.В. Гаак // Актуальные вопросы энергетики : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2024. С. 190–195.

8. Грицай А.С. Особенности построения биллинговой системы для энергосбытовой компании с целью обеспечения максимальной точности прогнозирования // Динамика систем, механизмов и машин: тез. докл. Междунар. научн.-техн. конф. Омск: ОмГТУ, 2009. С. 250–254.

9. Горшенин А.Ю., Применение машинного обучения деревьев решений для краткосрочного прогнозирования электропотребления / А.Ю. Горшенин, А.С. Грицай, Л.А. Денисова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 226–231. DOI 10.24412/2071-6168-2023-11-226-227.

10. Хомутов С.О. Методика формирования обучающей выборки в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления гарантирующего поставщика / О.С. Хомутов, Р.Н. Хамитов, А.С. Грицай, Н.А. Серебряков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 227-233.

11. Дугин Д.Д. О механизмах функционирования оптового рынка электроэнергии / Д.Д. Дугин, В.А. Самусь, Д.К. Габбасов [и др.] // Актуальные вопросы энергетики: материалы Международной научно-практической конференции. Омск: Омский государственный технический университет, 2017. С. 239-243.

12. Бахтеева Н.З. Конкурентный оптовый рынок электроэнергии и мощности: состояние и новые вызовы / Н.З. Бахтева, Л.А. Галимзянов, З.В. Шацких // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 70-78.

13. Федоров Я.П. Повышение точности прогнозирования электропотребления субъектов ОРЭМ с использованием нечётких нейронных сетей / Я.П. Федоров, В.Л. Бурковский, А.Л. Руцков // Энергетические системы. 2019. № 1. С. 176-182.

14. Горшенин А.Ю. Сравнение методов на основе деревьев решений в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления // Математические структуры и моделирование. 2023. № 4(68). С. 12-21. DOI 10.24147/2222-8772.2023.4.12-21.

15. Мигранов М.М. Прогнозирование потребления электроэнергии. Практика применения / М.М. Мигранов, А.А. Устинов, А.В. Мельников // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2(47). С. 44-53.

16. Моргоева А.Д. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения / А.Д. Моргоева, И.Д. Моргоев, Р.В, Клюев, О.А. Гаврина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 7. С. 115-125. DOI 10.18799/24131830/2022/7/3527.

17. Горшенин А.Ю. Разработка и верификация программного обеспечения системы краткосрочного прогнозирования электропотребления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 253-259. DOI 10.24412/2071-6168-2024-7-253-254.

18. Серобабов А.С. Разработка и верификация программного обеспечения системы принятия врачебных решений / А.С. Серобабов, А.Л. Серобабова, Л.А. Денисова // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2023. № 1. С. 79-84. DOI 10.25206/2310-4597-2023-1-79-84.

Блохин Александр Владимирович, аспирант, sasha_bloh@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF A SYSTEM FOR SHORT-TERM FORECASTING OF POWER CONSUMPTION OF A RESOURCE SUPPLYING ENTERPRISE

A.V. Blokhin

The article considers the development and verification of a short-term forecasting system for electricity consumption for a resource supplying enterprise. The system uses retrospective data on electricity consumption by the enterprise and allows forecasting consumption based on a user-specified date, day of the week, and holiday status. The article also considers the methods and results of software verification, confirming the correctness and stability of the system.

Key words: power consumption, short-term forecast, machine learning, software verification, data analysis, software testing.

Blokhin Alexandr Vladimirovich, postgraduate, sasha_bloh@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 621.391.8
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-268-269

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ОБНАРУЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИХ ПОЛОЖЕНИЯ В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО СРЕДСТВА

А.А. Закутаев, А.А. Михайлов, В.М. Лизан

Проведен обзор существующих подходов к учету теряемого объема сигнала за счет дискретной структуры матричных фотоприемных устройств при наблюдении удаленных объектов. Предложен подход к оцениванию вероятности превышения заданной доли потенциально доступного для регистрации сигнала от точечного объекта, определяемой заданными характеристиками оптико-электронного средства. Показано, что потеря сигнала за счет дискретной структуры матричных фотоприемных устройства является независимым событием, вероятность наступления которого может рассматриваться отдельно от других составляющих процесса функционирования оптико-электронного средств. Представлено формализованное описание порядка учета вероятности превышения заданной доли потенциально доступного для регистрации сигнала от точечного объекта при решении задачи оценивания вероятности его обнаружения.

Ключевые слова: оптико-электронное средство, вероятность обнаружения, матричное фотоприемное устройство, пеленгационная характеристика.

Несмотря на значительные достижения технологий создания полупроводниковой техники и оптико-электронного приборостроения коэффициент заполнения современных отечественных матричных фотоприемных устройств (МФПУ) не достигает единицы [1, 2]. Как следствие, процесс функционирования оптико-электронных средств (ОЭС) «смотрящего» типа сопровождается потерями полезного сигнала, в том числе обусловленными дискретной структурой МФПУ. Наиболее сильно указанный эффект проявляется при наблюдении объектов на предельных дальностях. Исследованиям влияния характеристик ОЭС в целом и МФПУ в частности на объем теряемого полезного сигнала посвящено большое количество работ [3-12]. Вместе с тем, в большинстве из них оценивание соответствующего показателя проводилось для предельных случаев. При решении ряда задач, например поиска или обнаружения, априорная информация о положении объекта наблюдения (ОН) в поле зрения ОЭС отсутствует, следовательно координаты центра его проекции в плоскости МФПУ могут рассматриваться как случайные. Исходя из этого, объем теряемого полезного сигнала, попадающего в зону нечувствительности на поверхности матрицы, может рассматриваться как вероятностная величина с определенной характеристикой распределения. Знание указанной характеристики необходимо в случае поиска рациональных вариантов построения ОЭС на основе комплексных показателей эффективности, при которых получение экстремальных решений недостаточно. Таким образом, исследование вопросов обнаружения удаленных объектов в условиях априорной неопределенности их положения в поле зрения ОЭС, в частности оценивания вероятностной составляющей теряемого объема полезного сигнала вследствие дискретной структуры МФПУ, является актуальной задачей.

Анализ подходов к оцениванию потерь полезного сигнала за счет дискретной структуры МФПУ. В общем случае наблюдаемый ОЭС объект называется точечным (малоразмерным), когда проекция его линейных размеров в плоскости МФПУ не превышает соответствующие линейные размеры фоточувствительного элемента (ФЧЭ). При прохождении сигнала от подобных объектов через оптическую систему ОЭС происходит пространственное перераспределение его энергии в плоскости фокусировки, вызываемое эффектами дифракции. Если интегральное значение энергии, содержащееся в дифракционной картине, принять равным 1, то объем доступного к регистрации ФЧЭ МФПУ $N_{\text{рег}}$ и теряемого сигнала $N_{тер}$ может быть представлен равенством вида:

$$N_{\text{рег}} + N_{\text{тер}} = 1, \quad (1)$$

где $N_{\text{рег}}$ и $N_{\text{тер}}$ выражены в виде соответствующих долей.

Наиболее распространенный способ учета теряемого сигнала основан на введении коэффициента эффективности использования центрального пятна дифракционной картины – диска Эри, ФЧЭ МФПУ. Во многих источниках указанный коэффициент представляется в виде константы, принимающей значения от 0,6 до 0,8 [9 - 11].

Вместе с тем, согласно теории распространения электромагнитного излучения, а также построения и функционирования оптических систем соотношение $N_{\text{рег}}$ и $N_{\text{тер}}$ будет зависеть от большого количества факторов:

- характеристик оптического излучения – длина волны;
- характеристик ОЭС – диаметра входного зрачка, фокусного расстояния, величины центрального экранирования;
- характеристик МФПУ – линейный размер ФЧЭ и расстояние между ними;
- влиянием аберраций оптической системы ОЭС;
- координатами центра проекции ОН в плоскости МФПУ;

и др.

В ряде работ [2, 7, 8] проводилась более детальная оценка указанной особенности, основанная на определении пеленгационной характеристики дискретного МФПУ. Однако, расчет ее значение выполнялся для отдельных сечений или в точках экстремума.

В рамках рассматриваемого направления исследований также проводились работы по оцениванию влияния центра изображения наблюдаемого удаленного динамического объекта на обнаружительные характеристики ОЭС [12]. Вместе с тем, в них линейный размер вышеуказанного изображения значительно превышал соответствующий линейный размер ФЧЭ матричного ФПУ.

Общим недостатком указанных работ является отсутствие оценки вероятности наступления события, при котором доля зарегистрированного сигнала примет какое-либо значение из допустимого диапазона.

Предложения по оцениванию вероятностных характеристик теряемого объема полезного сигнала, регистрируемого дискретным матричным ФПУ

Объектив ОЭС при наблюдении точечного объекта формирует в фокальной плоскости его изображение, которое может быть описано соответствующей функцией рассеяния точки (ФРТ). Для идеальной оптической системы, когда пространственные искажения регистрируемого излучения будут ограничены только эффектами дифракции, ФРТ в плоскости МФПУ будет иметь вид [13]:

$$PSF(x,y) = K_1\left[\frac{J_1(z)}{z}\right]^2, \tag{2}$$

где *PSF* – функция рассеяния точки; *x, y* – координаты точки в плоскости МФПУ; K_1 – коэффициент пропорциональности, описывающий потери сигнала при его распространении; J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка; *z* – аргумент функции, имеющий вид:

$$z = \frac{\pi D_{\text{вх.зр.}}\sqrt{x^2+y^2}}{f\,\lambda},$$

$D_{\text{вх.зр.}}$ – диаметр входного зрачка объектива ОЭС; *f* – фокусное расстояние; λ – длина волны оптического излучения.

Поскольку МФПУ имеет дискретную структуру, то часть сигнала будет теряться, попадая в области нечувствительности. Функция *FPE*, описывающая указанный процесс, может быть представлена в следующем виде:

$$FPE(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{b}\right), \tag{3}$$

где rect (…) – функция вида:

$$\text{rect}\left(\frac{u}{g}\right) = \begin{cases} 1 & \text{при} \quad |u| \le \dfrac{g}{2}, \\ 0 & \text{при} \quad |u| > \dfrac{g}{2}. \end{cases}$$

С учетом регулярности расположения ФЧЭ с точки зрения вероятностного характера расположения центра изображения ОН форма и размер значащей поверхности МФПУ, в пределах которой величина регистрируемого сигнала будет изменяться, может быть ограничена областью, представленной на рисунке 1.

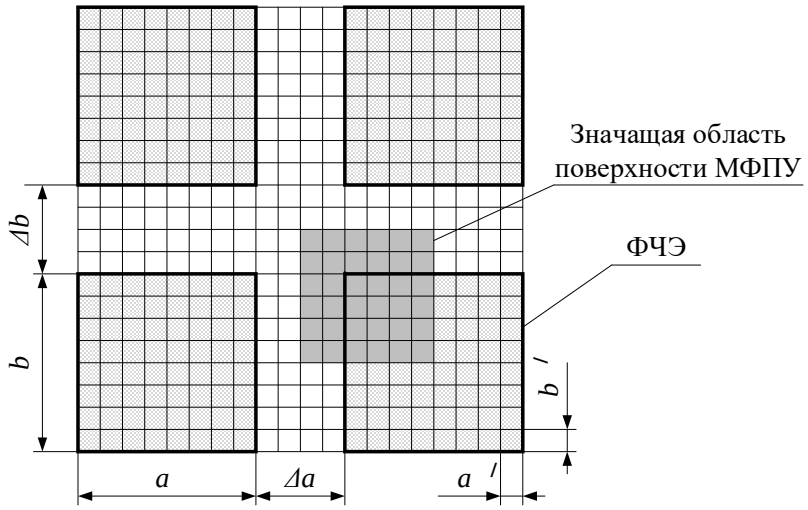


Рис. 1. Графическое представление значащей области поверхности МФПУ для оценивания величины регистрируемого сигнала при равновероятном положении геометрического центра изображения объекта наблюдения

При выполнении численных расчетов указанная область может рассматриваться как совокупность элементарных площадок, доля регистрируемого сигнала от ОН, в пределах которых не зависит от расположения центра его изображения (рис. 1). При размерах площадки $a'\times a'$ мощность множества допустимых вариантов расположения центра изображения ОН в плоскости МФПУ *S* будет определяться следующим выражением:

$$|S| = \left(\frac{a+\Delta a}{2a'}\right)^2. \tag{4}$$

Приняв амплитуду входного сигнала равной 1 с использованием выражения (2) и (3) может быть определена доля сигнала $N_{\text{рег}}$, регистрируемого при нахождении геометрического центра изображения ОН в каждой из элементарных площадок относительно ближайшего к ней ФЧЭ:

$$N_{\text{рег}}(\theta,\varphi) = \int_i\int_j PSF\left[(i-1)a' + \frac{a'}{2} - x, (j-1)b' + \frac{b'}{2} - y\right] FPE(x,y) \tag{5}$$

где θ, φ – координаты ближайшего ФЧЭ; *i, j* – координаты элементарных площадок.

Результаты соответствующих расчетов при разбиении диапазона $N_{\text{рег}}$ на 100 интервалов ΔN_i могут быть сведены в таблицу, в которой $q_{\text{эл.пл.}}$ – количество элементарных площадок, при нахождении в которых центра изображения ОН величина зарегистрированного сигнала в ФЧЭ попала в интервал ΔN_i, а $P_{\text{инт}}$ – значение соответствующей вероятности.

Распределение количества элементарных площадок относительно выбранных диапазонов значений регистрируемой доли сигнала и вероятностей их появления

Значение интервала, на который приходится доля сигнала, зарегистрированного в ФЧЭ, отн. ед.	Количество элементарных площадок $q_{эл.пл.}$, ед.	$P_{инт}$
$\Delta N_1 = 0…0{,}01$	q_1	$P_{инт\ 1}$
$\Delta N_2 = 0{,}011…0{,}02$	q_2	$P_{инт\ 2}$
$\Delta N_3 = 0{,}021…0{,}03$	q_3	$P_{инт\ 3}$
…	…	…
$\Delta N_{100} = 0{,}991…1$	q_k	$P_{инт\ 100}$

При этом сумма всех $q_{эл.пл.}$ будет равна |S|, а выражение для расчета $P_{инт\ i}$ с учетом принятых допущений будет иметь вид [14]:

$$P_{инт\ i} = \frac{q_i}{|S|}. \quad (6)$$

Одной из ключевых характеристик распределения случайной величины является закон ее распределения. Из теории вероятности известно, что для дискретной случайной величины ее функция распределения $F(x)$ рассчитывается путем сложения вероятностей событий, когда принятые ею значения были меньше или равны выбранному значению x [14]. В рассматриваемом случае под x будет пониматься значение N_i. Исходя из этого, $F(N_1)$, где N_1 принадлежит интервалу ΔN_1, будет равно $P(N_1 < \max \Delta N_1) = P_{инт\ 1}$, $F(N_2) = P(N_2 < \max \Delta N_2) = P_{инт\ 1} + P_{инт\ 2}$, где $N_2 \in [\Delta N_1 \cup \Delta N_2]$, $F(N_3) = P(N_3 < \max \Delta N_3) = P_{инт\ 1} + P_{инт\ 2} + P_{инт\ 3}$, где $N_3 \in [\Delta N_1 \cup \Delta N_2 \cup \Delta N_3]$, и т.д.

Поскольку задача обнаружения сигнала от ОН подразумевает превышение его амплитуды заданного порогового значения, то для учета вероятностного характера расположения центра изображения ОН относительно ФЧЭ необходимо использовать функцию $F'(\gamma_i)$ обратную $F(N_i)$.

Вышеописанный подход обладает относительной универсальностью и может применяться для различных видов ФРТ.

Результаты реализации предложенного подхода. Для получения численных оценок величины регистрируемого сигнала в зависимости от положения геометрического центра изображения ОН относительно центра ФЧЭ было выбрано ОЭС со следующими характеристиками:

- диаметр входного зрачка – 0,36 м;
- фокусное расстояние – 2 м;
- линейный размер ФЧЭ – 6×6 мкм;
- расстояние между ФЧЭ – 2 и 2 мкм по горизонтали и диагонали, соответственно;
- рабочая длина волны – 0,535 мкм.

При проведении расчетов были приняты следующие допущения:

- центральное экранирование входного зрачка отсутствует;
- оптическая система ОЭС является безаберрационной, ФРТ оценивается в пределах третьего дифракционного кольца;
- значение коэффициента K_1 равен 1;
- линейный размер элементарной площадки по горизонтали и вертикали был выбран 10×10 мкм.

На рисунке 2 представлено распределение доли регистрируемого в ближайшем ФЧЭ сигнала при нахождении геометрического центра изображения ОН в каждой из элементарных площадок.

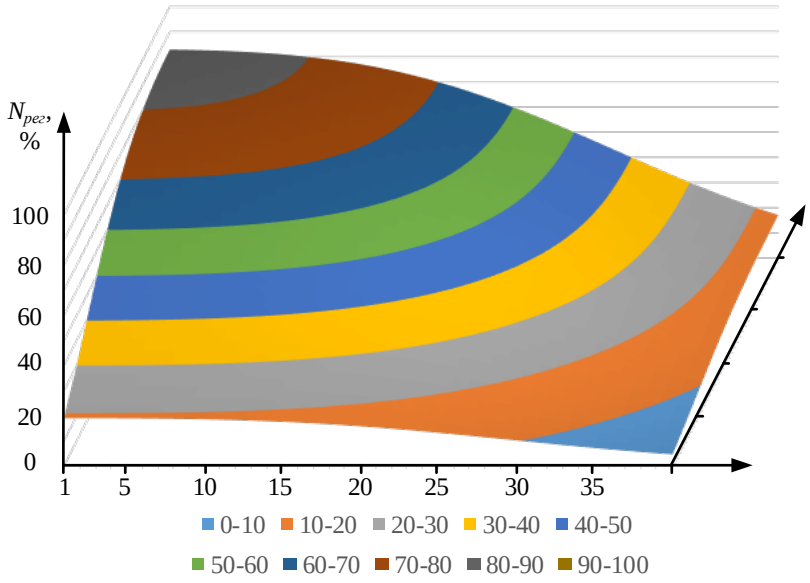


Рис. 2. Распределение доли регистрируемого в ближайшем ФЧЭ сигнала $N_{рег}$ при нахождении геометрического центра изображения ОН в каждой из элементарных площадок: m', n' – номера элементарных площадок по горизонтали и вертикали, соответственно

При помощи выражения (6) была определена функция распределение доли регистрируемого в ближайшем ФЧЭ сигнала $N_{рег}$ относительно заданных интервалов ΔN_i. График полученной функции представлен на рисунке 3.

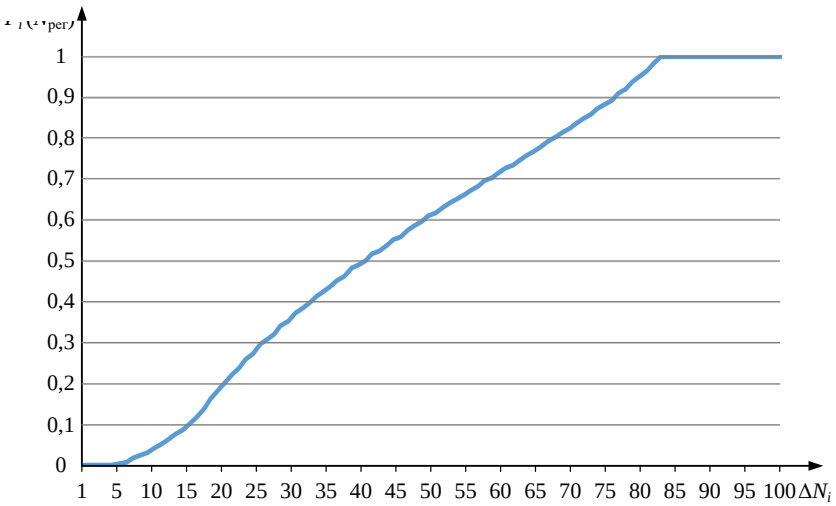


Рис. 3. График функции распределение доли регистрируемого в ближайшем ФЧЭ сигнала N_{per} относительно заданных интервалов ΔN_i

С учетом сущности понятия функции распределения дискретной случайной величины и принятых допущений, функция обратная ей может быть представлена в виде следующего равенства:

$$F'\left(N_{per}\right) = P_{пр}\left(N_{per} \geq \gamma\right), \tag{7}$$

в котором $P_{пр}$ будет являться вероятностью того, что случайная величина N_{per} – доля зарегистрированного сигнала, примет частное значение, большее или равное γ.

На рисунке 4 представлена зависимость значения вероятности события, при котором доля зарегистрированного сигнала будет равна или превысит значение γ_i из заданного диапазона, описывающего все возможные положения центра изображения точечного объекта относительно центра ФЧЭ.

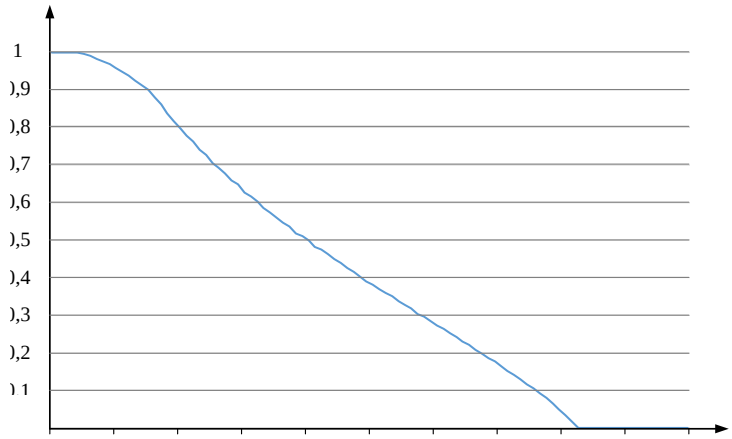


Рис. 4. Зависимость значения вероятности события, при котором доля зарегистрированного сигнала будет равна или превысит значение γ_i

На графике можно выделить три выраженных участка:

- гарантированно обеспечивается регистрация только до 0,07 долей сигнала;
- регистрация доли сигнала в диапазоне от 0,83 до 1 ОЭС с заданными характеристиками и принятыми условиями не обеспечивается;
- в диапазоне от 0,07 до 0,83 доля регистрируемого сигнала равномерно убывает.

Анализ полученной зависимости показывает, что при использовании коэффициента эффективности использования центрального пятна дифракционной картины для оценивания амплитуды регистрируемого ОЭС сигнала, равного, например 0,7, вероятность принятия им такого значения составит менее 20 %. Однако это не учитывается при последующей оценки вероятности обнаружения удаленного объекта с заданными характеристиками.

Предложения по совершенствованию подходов к оцениванию вероятности обнаружения удаленных объектов в условиях априорной неопределенности их положения в поле зрения ОЭС.

Подавляющее большинство оптико-электронных систем обнаружения функционирует в автоматическом режиме. Его сущность заключается в априорном выборе критериальных параметров и их значений, на основе которых проводится анализ регистрируемых ОЭС сигналов от различных объектов, находящихся в его поле зрения, и принятие решения об обнаружении. Несмотря на большое количество известных в настоящее время подходов к определению значений вышеуказанных критериальных параметров [15], ключевой операцией является сравнение уровня зарегистрированного сигнала u_{ij} со значением критериального параметра u_0, принятого в качестве порога. Тогда вероятность подобного события может быть представлена выражением:

$$P_{\text{обн}} = P\left(u_{ij} \geq u_0\right), \tag{8}$$

где *i, j* – номер ФЧЭ в матричном ФПУ.

Очевидно, что уровень сигнала u_{ij} будет зависеть от множества факторов и в общем случае может быть представлен в виде следующей функциональной зависимости:

$$u_{ij} = f\left(\mathrm{X}, \mathrm{Y}, \mathrm{V}, \mathrm{Z}\right), \tag{9}$$

где **X** – множество характеристик ОЭС; **Y** – множество характеристик объекта наблюдения; **V** – множество характеристик фоновых объектов; **Z** – множество характеристик условий наблюдения.

Положение объекта наблюдения в поле зрения ОЭС, а следовательно в плоскости его МФПУ, будет определяться их координатами в пространстве и ориентацией визирной оси ОЭС. При заданных значениях последних при прочих равных уровень сигнала может быть представлен в виде следующей зависимости:

$$u^*_{hl} = u_{ij}\left(1 - k_{\text{пел}}\right) = \gamma u_{ij}\,, \tag{10}$$

где u^*_{hl} – уровень сигнала, который фактически будет зарегистрирован в ближайшем к центру изображения объекта наблюдения ФЧЭ (*h, l*) с учетом влияния дискретной структуры МФПУ; $k_{\text{пел}}$ – коэффициент, определяющий долю теряемого сигнала за счет дискретной структуры МФПУ.

Правомерность выражения (10) обусловлена независимостью теряемого объема полезного сигнала, вызываемого дискретной структурой МФПУ, и может рассматриваться и оцениваться независимо от других факторов, определяющих u_{ij}. Исходя из этого, потеря сигнала может быть представлена как вероятностное событие, выражающееся в принятии γ какого-либо конкретного значения. В соответствии с представленным выше обоснованием, распределение вероятностной величины γ, может быть определено для заданных характеристик ОЭС и рабочего диапазона длин волн.

С учетом этого и (10), выражением (8) примет вид [16]:

$$P_{\text{обн}} = P\left(u^*_{hl} \geq u_0\right) = P\left(P_{\text{пр}}[\gamma] u_{ij} \geq u_0\right) = P^*_{\text{пр}} P\left(\gamma^* u_{ij} \geq u_0\right), \tag{11}$$

где γ* – конкретное значение доли зарегистрированного сигнала, соответствующей выбранному значению вероятности его превышения $P^*_{\text{пр}}$.

Анализ выражений (8) и (11) показывает, что при прочих равных влияние дискретной структуры МФПУ при наблюдении удаленных объектов в условиях априорной неопределенности их положения в поле зрения ОЭС будет одновременно влиять на оценку как амплитуды регистрируемого сигнала от объекта наблюдения, так и соответствующей вероятности его обнаружения. Исходя из этого, учет указанного фактора на практике может быть реализован в два этапа. На первом этапе осуществляется коррекция оценки амплитуды регистрируемого сигнала путем введения коэффициента γ. На втором этапе полученная оценка вероятности события, заключающегося в превышении зарегистрированным сигналом выбранного порога, также корректируется введением $P_{\text{пр}}$.

Заключение. Проведен анализ существующих подходов к учету теряемого объема сигнала за счет дискретной структуры матричных ФПУ при наблюдении удаленных объектов. Предложен подход к определению вероятности превышения заданной доли потенциально доступного для регистрации сигнала от точечного объекта ОЭС, имеющим заданные значения характеристик. Показано, что потеря сигнала за счет дискретной структуры МФПУ является независимым событием и вероятность его наступления может рассматриваться отдельно. Представлено формализованное описание порядка учета вероятности превышения заданной доли потенциально доступного для регистрации сигнала от точечного объекта при решении задачи оценивания вероятности его обнаружения. Практическая значимость полученного результата заключается в повышении точности оценивания обнаружительных характеристик ОЭС.

Список литературы

1. Каталог продукции АО «Центральный научно-исследовательский институт «Электрон» (РОСЭЛ). [Электронный ресурс] URL: http://old.electron.spb.ru (дата обращения: 20.04.2023).

2. Квантово-оптические устройства. Физические основы функционирования и принципы построения приемников излучения: уч. пособие / Иванов В.Г., Каменев А.А., Гусаков В.М. и др. под общ. ред. Иванова В.Г. СПб: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2017. 286 с.

3. Дахин А.М., Фантиков О.И. Влияние дискретности фотоприемника на пороговую чувствительность телевизионной системы обнаружения // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. Л.: НИИ Телевидения. 1983, Вып. № 1. С. 50 – 59.

4. Баранов П.С., Манцветов А.А. Оптимизация отношения радиуса кружка рассеяния объектива к размеру пиксела для повышения точности оценки координат изображений малоразмерных объектов // Известия вызов России. Радиоэлектроника. 2016, Вып. № 2. С. 49 – 53.

5. Смирнов В.И. Наноэлектроника, нанофотоника и микросистемная техника. Ульяновск: УлГТУ, 2017. 280 с.

6. Березин В.В., Цыцулин А.К. Обнаружение и оценивание координат изображений точечных объектов в задачах астронавигации и адаптивной оптики // Вестн. ТОГУ. 2008, Т. 1, Вып. № 8. С. 11–20.

7. Старовойтов Е.И., Юрчик И.А. Метод снижения потерь при обнаружении динамического точечного объекта лазерной локационной системой с линейкой фотодетекторов // Радиостроение. 2019, Вып. № 1. С. 1 – 8.

8. Иванов В.А., Киричук В.С., Косых В.П., Синельщиков В.В. Особенности обнаружения точечных объектов в изображениях, формируемых МФПУ // Автометрия. – Новосибирск: Институт автоматики и электрометрии СО РАН. 2016, Т. 52, Вып. № 2. С. 10 – 19.

9. Иванов В.Г., Каменев А.А. Оценивание дальности обнаружения космических объектов бортовой многоспектральной оптико-электронной аппаратурой с матричными фотоприемными устройствами смотрящего типа // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. СПб.: НИИТ. 2016, Вып. 3. С. 14 – 22.

10. Логунов С.В., Черногубов А.В., Федоренко Д.С. Моделирование процесса спектрофотометрирования искусственного спутника Земли // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. СПб.: НИИТ. 2019, Вып. 3. С 10 – 21.

11. Калинин Т.В., Лисицкий В.В., Демидова Н.С. и др. Математическая модель обнаружения баллистического космического объекта многоспектральным оптико-электронным комплексом // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 232 – 248.
12. Козирацкого Ю.Л. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов: монография. М.: Радиотехника, 2015. 456 с.
13. Коронкевич В.П. Формирование изображения в оптических системах: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 76 с.
14. Веселовская А.З., Шепелявая Н.Б. Элементы теории вероятностей. Случайные величины: уч. пособ. СПб.: СПбГУ, 2019. 94 с.
15. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: учебн. для вузов. М. Радиотехника, 2004. 320 с.
16. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебн. для вузов. 6-е изд. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.

Закутаев Александр Александрович, начальник 562 лаборатории военного института (научно-исследовательского), zakutaev.a@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Михайлов Александр Александрович, младший научный сотрудник 562 лаборатории военного института (научно-исследовательского), ichi.lol@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Лизан Вячеслав Миронович, младший научный сотрудник 562 лаборатории военного института (научно-исследовательского), ichi.lol@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

STUDY OF THE ISSUES OF DETECTING REMOTE OBJECTS UNDER CONDITIONS OF A PRIORI UNCERTAINTY OF THEIR POSITION IN THE FIELD OF VIEW OF AN OPTICAL-ELECTRONIC MEANS

A.A. Zakutaev, A.A. Mikhailov, V.M. Lizan

The article presents a review of existing approaches to accounting for the signal volume lost due to the discrete structure of matrix photodetectors when observing remote objects. An approach is proposed to assess the probability of exceeding a given share of the signal potentially available for recording from a point object, determined by the specified characteristics of the optical-electronic device. It is shown that the loss of a signal due to the discrete structure of matrix photodetectors is an independent event, the probability of which can be considered separately from other components of the functioning of the optical-electronic device. A formalized description of the procedure for accounting for the probability of exceeding a given share of the signal potentially available for recording from a point object when solving the problem of estimating the probability of its detection is presented.
Key words: optoelectronic device, detection probability, matrix photodetector, direction finding characteristic.

Zakutaev Alexander Alexandrovich, head of laboratory of military institute (research), zakutaev.a@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy of Mozhaisky,

Mikhailov Alexander Alexandrovich, junior research fellow of laboratory of military institute (research), ichi.lol@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy of Mozhaisky,

Lyzan Vyacheslav Myronovych, junior research fellow of laboratory of military institute (research), ichi.lol@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy of Mozhaisky

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-273-274

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОЛИЧЕСТВА ПЛОДОВ ТОМАТОВ И ИХ СОСТОЯНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

А.С. Грицай, А.В. Шимохин, А.А. Лучинович, С.Н. Болтовский, А.Е. Симоненко, И.В. Червенчук

В данном исследовании главной задачей разработанной информационной системы является определение плодов растения на цифровом изображении с последующим разделением на группы в соответствии с известными цветовыми диапазонами [1,2]. Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи: уменьшение возможных искажений исходного изображения; анализ изображения для обнаружения на нем плодов помидора.
Ключевые слова: компьютерное зрение, автоматизация тепличного хозяйства, растениеводство.

Основными целями автоматизации процессов являются повышение качества и производительности исполнения процесса. Автоматизированный процесс обладает более стабильными характеристиками, чем процесс, выполняемый в ручном режиме.

Одним из инструментов автоматизации является искусственный интеллект в целом и компьютерное зрение в частности.

Компьютерное зрение (также называемое машинным зрением) – это научное направление в области искусственного интеллекта и связанные с ним технологии получения изображений объектов реального мира, их обработки и использования, полученных данных для решения разного рода прикладных задач без участия (полного или частичного) человека. С точки зрения инженерии, при помощи компьютерного зрения автоматизируются задачи, которые может выполнять зрительная система человека.

Функции компьютерного зрения охватывают методы приобретения, обработки, анализа и интерпретации цифровых изображений, а также извлечение информации из окружающего мира для получения числовых или символьных данных.

В контексте растениеводческого сельского хозяйства автоматизация в первую очередь способна повлиять на увеличение урожайности и повышение качества итогового продукта, путем лучшего контроля окружающих условий и своевременного обнаружения каких-либо отклонений в развитии и росте растений и плодов, на повышение производительности, путем замены множеством более точных и оперативно реагирующих на внешние изменения автоматизированных систем (например полива или поддержания температуры) участия человека и, тем самым, упрощая его роль в выращивании культур, и на скорость сопутствующих процессов (например, сортировки плодов или поиска отклонений в росте растений).

Технологии компьютерного зрения в контексте выращивания плодов позволяют анализировать состояние (например, стадию роста) плодов томата и вести их учет.

Классификация плодов томата по стадиям созревания возможна по их внешнему цвету. Основными этапами созревания плода томата являются:

молочная стадия;

бурая стадия;

розовая стадия;

красная стадия [3].

На молочной стадии зрелости плоды имеют твердой кожурой, светло-зеленую с беловатым оттенком окраску поверхности, светло-зеленую мякоть с началом ослизнения вокруг семян.

Плоды в данной стадии хорошо хранятся и окончательно дозревают через 2-3 недели [3,4].

На следующем этапе зрелости томата происходит смена цвета на коричневый, более известный как бланжевый. В это время плод начинает приобретать характерный оттенок для данного сорта и приближается к своим оптимальным размерам, оставаясь при этом твердым и упругим на ощупь. Такие томаты можно хранить, но для их полного созревания требуется гораздо меньше времени, чем для молодой спелости – обычно 6-7 дней [3,4].

Плоды в период розового развития обладают плотным составом и окрашены в оттенки от светло-розового до оранжевого. Около половины их поверхности может быть покрыто желтоватым или буроватым оттенком.

Заключительной стадией развития томата является красная стадия созревания. Плоды на данной стадии плотные, полной биологической зрелости, характерной для ботанического сорта окраски. Плоды этой стадии имеют небольшой период хранения (порядка нескольких дней) и должны быть употреблены или законсервированы в кратчайший срок. Отличительной чертой созревшего помидора является характерный блеск кожуры [3].

Т.к. различные сорта зачастую имеют различные внешние цвета на всех этапах созревания, для корректной классификации необходимо для каждого отдельного сорта определять характерные ему цвета.

1. Разработка информационной системы мониторинга количества плодов томатов в теплице. На диаграмме (рисунок 1) продемонстрировано, что разработанная информационная система предполагает использование в качестве подключаемой библиотеки к какой-либо внешней системе.

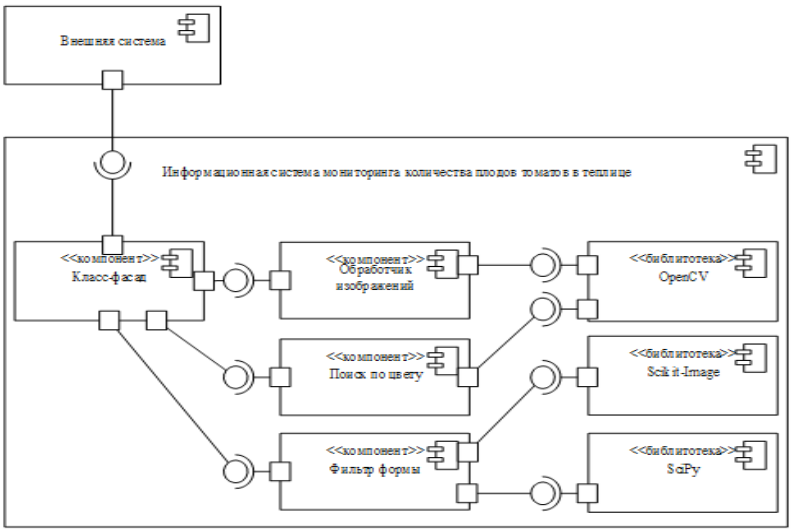


Рис. 1. Диаграмма компонентов проектируемой информационной системы

Внешняя система может представлять собой программный или программно-аппаратный комплекс на основе поддерживающей интерпретатор Python платформы (к примеру, смартфон или одноплатный компьютер с видеокамерой). Данная система предоставляет разрабатываемой информационной системе необходимые для распознавания плодов томата изображения и использует в зависимости от поставленной задачи полученный результат. Также разрабатываемая информационная система предусматривает возможность дальнейших обработки и анализа полученных результатов (информацию о размерах и положении плодов томатов на изображении) внешней системой

(например, использование средств искусственного интеллекта для повышения точности обнаружения плодов томата или для расширения возможностей распознавания в затрудненных условиях). Разработанный алгоритм можно разделить на несколько основных этапов.

Первый этап – подготовительный. На нем происходит получение исходного изображения, на котором необходимо распознать плоды томатов, диапазонов цветов, в пределах которых предполагается нахождение цветов искомых плодов томатов, и пользовательские параметры внешней геометрической формы искомых плодов томатов. Если цветовые диапазоны и параметры геометрической формы не были переданы, то в дальнейшем на этапе цветового поиска и на этапе фильтрации по внешней форме будут использованы предусмотренные диапазоны по умолчанию. Также на этом этапе от внешней вызывающей системы поступают параметры для включения/выключения следующих функций разработанной системы:

выравнивание яркости изображения;

корректировка цветового баланса;

разделение объектов на изображении.

Второй этап представляет собой предварительную обработку изображения и в свою очередь состоит из двух шагов:

минимизация негативных эффектов, которые могут быть вызваны разными условиями освещения;

минимизация негативных эффектов, связанных с общей зашумленностью изображения.

Третий этап – этап анализа изображения с целью поиска на нем плодов томатов. Данный этап подразделяется на три шага:

шаг поиска по цвету;

шаг обработки бинаризованного изображения;

шаг фильтрации объектов по внешней форме.

Шаг поиска по цвету заключается в классификации объектов на основе их цветовых характеристик. Задача заключается в разработке алгоритма или модели, способной автоматически определять принадлежность объекта к одному из заданных классов на основе его цветовой информации.

Принцип действий, происходящих на данном шаге, заключается в последовательной проверке всех пикселей изображения на вхождение их цвета в диапазон или диапазоны, полученные на первом этапе. Результатом данного шага является бинаризованное изображение, на котором белым цветом обозначены позиции пикселей, удовлетворяющих вышеописанным условиям, все остальное пространство заполняется черный цветом. Каждому переданному на первом этапе цветовому диапазону соответствует свое бинарезированное изображение. Данная обработка служит для фильтрации небольших объектов, которые обладают искомыми цветами и имеют небольшой размер (порядка 30x30 пикселей). Данные малые объекты, наиболее вероятно, не являются искомыми плодами томатов. Для фильтрации более крупных объектов служит следующая стадия.

Шаг фильтрации объектов по внешней форме. – итерация поиска на изображении объектов, формой похожих на плод томата, и фильтрация всех остальных объектов. Анализ формы объекта основывается на следующих основных параметрах:

площадь;

округлость;

выпуклость;

коэффициент инерции.

Задача распознавания формы заключается в отнесении исходных данных к определённому классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти данные, из общей массы данных.

Результатом этапа анализа изображения являются список с информацией о положении и размерах найденных объектов и их бинаризованные изображения для каждого отдельного цветового диапазона. В результате работы разработанной информационной системы формируется список найденных объектов в соответствии с исходными цветовыми диапазонами и возвращается внешней системе для дальнейшей обработки.

1.1. Предварительная обработка изображения. Перед тем как проводить непосредственно анализ и поиск объектов, необходимо подготовить исходное изображение. Это необходимо для того, чтобы минимизировать последствия воздействия искажений и усилить некоторые особенности объектов для преобразования изображения к форме, подходящей для дальнейшего анализа. Примеры таких операций включают коррекцию экспозиции, цветовую балансировку, уменьшение шума изображения, повышение резкости и коррекция формы изображения [4-6].

Данный этап в разработанной информационной системе имеет следующий алгоритм, представленный на рисунке 2.

Наиболее существенные проблемы, которые могут препятствовать дальнейшему распознаванию, можно разделить на две категории:

проблемы, связанные с освещением;

проблемы, связанные с шумами и искажениями отдельных пикселей на изображении.

Основная проблема распознавания связана с освещением. Это разный цветовой баланс на разных исходных изображениях. Данная проблема может являться результатом разных условий освещения сцены во время запечатления объекта и может приводить к тому, что один и тот же объект (или схожие по цвету объекты) на разных фотографиях при разных условиях освещения или настройках фотооборудования будут иметь разный цвет, что препятствует дальнейшему анализу изображения.

Баланс белого цвета изображения главным образом зависит от цветовой температуры освещения сцены. Цветовая температура (спектрофотометрическая или колориметрическая температура; обозначается T_c и измеряется в кельвинах) определяется, согласно формуле Планка, как температура абсолютно черного тела, при которой оно испускает излучение того же цветового тона, что и рассматриваемое излучение.

В разрабатываемом алгоритме предварительной обработки повышение контраста осуществляется за счет использования метода линейной растяжки гистограммы, суть которого заключается в присвоении уровням яркости пикселов исходного изображения, лежащим в интервале $[f_{min}, f_{max}]$ новых значений с тем, чтобы охватить весь возможный интервал изменения яркости. Преобразование уровней яркости осуществляется по формуле:

$$g_i = a + b \cdot f_i \quad (1)$$

где f_i — старое значение яркости i-того пиксела, g_i — новое значение, a, b — коэффициенты, которые выбираются таким образом, чтобы $g_{min} = 0$, $g_{max} = 255$, и могут быть определены по формулам:

$$a = -(255 \cdot f_{min}) / (f_{max} - f_{min}) \quad (2)$$

$$b = 255 / (f_{max} - f_{min}) \quad (3)$$

Для фильтрации изображения используются двумерные фильтры, фильтрация в которых осуществляется за счет использования масок. При фильтрации маска перемещается по изображению, формируя отклик фильтра, значение которого присваивается пикселу нового изображения с координатами, соответствующими положению центра апертуры.

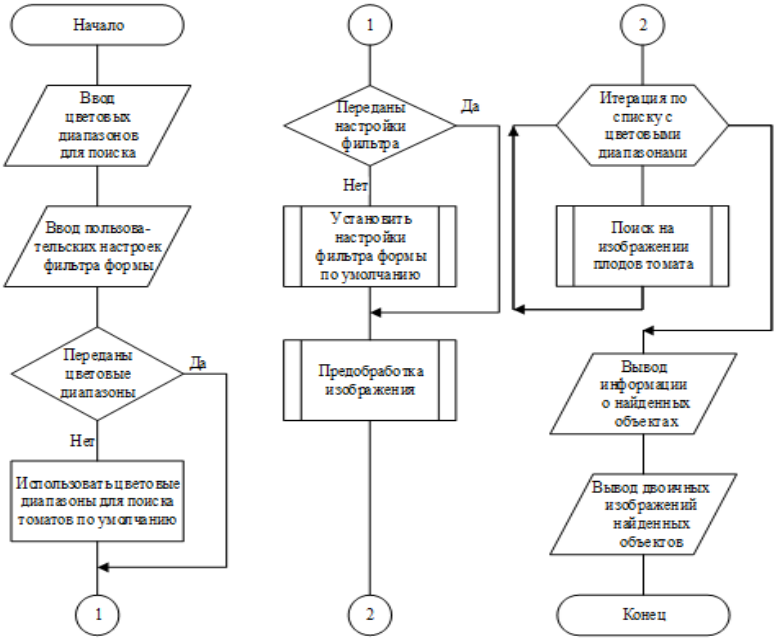


Рис. 2. Алгоритм предварительной обработки изображения

1.2. Корректировка цветового баланса изображения. Для решения вышеописанной проблемы в разработанной информационной системе применяется корректировка цветового баланса. Важной целью этой настройки является корректное отображение определенных цветов, особенно нейтральных. Следовательно, общий метод иногда называют балансом серого, нейтральным балансом или балансом белого. Цветовой баланс изменяет общую смесь цветов на изображении и используется для коррекции цвета. Преобразование в градации серого выполняются по формуле:

$$y = 0.2126 \cdot r + 0.7152 \cdot g + 0.0722 \cdot b \quad (4)$$

где r, g, b – цветовые компоненты исходного изображения, а y – выходное значение для пикселя изображения в оттенках серого.

Результаты работы описанного метода продемонстрированы ниже на рисунке 3 на примере двух одинаковых фотографий с различающимися параметрами баланса белого цвета.



Рис. 3. Корректировка цветового баланса у изображения с преобладающими теплыми оттенками (слева исходное изображение томата, справа со сбалансированным цветом и выровненной яркостью)

На этом примере можно увидеть, что на исходных фотографиях цвет одного и того же объекта, но с неодинаковыми параметрами баланса белого, различается, что может препятствовать дальнейшему анализу изображения и поиска на нем плодов томатов по характерному им цвету.

Стоит отметить, что в большинстве фотокамер уже реализован механизм коррекции цветового баланса. По этой причине в описываемой информационной системе предусмотрена возможность отключения балансировки в случае, если балансировка цвета проводится непосредственно при запечатлении объекта. Данное действие проводится аналогично выключению выравнивания освещения.

1.3 Поиск на изображении объектов, внешним видом похожих на плоды томатов. После предварительной обработки изображения следует основной этап работы данной информационной системы. На нем происхо-

дит непосредственно поиск объектов, похожих на плоды томатов. Данный этап можно разделить на следующие шаги, продемонстрированные на рисунке 4.

Первые два шага из представленных были частично освещены при описании общей схемы алгоритма (поиск по цвету и фильтрация небольших объектов). Стоит обратить внимание на последние три шага, представленных на рисунке 4.

Шаг заполнения черных внутренних областей объектов на бинаризованном изображении является подготовкой к последующему разделению соприкасающихся объектов. Нежелательные отверстия в объекте часто появляются, потому что условия освещения, при которых фотографируется объект, не идеальны. Необходимость этого этапа обоснована спецификой задачи разделения объектов, объединенных в бинаризованное изображение.

Шаг разделения соприкасающихся объектов необходим для решения соответствующей проблемы. Она заключается в том, что два объекта, имеющие близкие цвета и соприкасающиеся друг с другом, образуют на бинаризированном изображении один большой общий объект, что ведет к ошибкам в распознавании. Завершающим шагом распознавания является поиск на получившемся бинаризованном изображении объектов, с формой, похожей на плод томата.



Рис. 4. Диаграмма с шагами поиска плодов томата на изображении

Основой детектирования плодов томатов на изображении в разработанной информационной системе служит цветовой поиск. Принцип его работы заключается в последовательной проверке всех пикселей изображения на вхождение в заданный цветовой диапазон.

Удаление фона и листьев в разработанной системе основано на исключении пикселей определенных цветов с изображения. А именно пикселей, у которых в цветовом диапазоне Lab значение канала b* меньше значения 138 и в цветовом диапазоне RGB красная составляющая итогового цвета меньше значения 72.

Цветовой поиск в данной информационной системе проводится с использованием изображения в цветовой модели HSV.

В случае HSV цветовыми координатами являются:

тон (англ. hue);

насыщенность (англ. saturation);

яркость (англ. brightness, но в данном случае используется value).

Напротив, модель HSV облегчает работу с цветами, поскольку позволяет напрямую управлять светлотой и насыщенностью, не влияя на цветовой тон. В контексте поиска цвета она позволяет более точно выбирать цветовой диапазон.

1.4 Поиск по цвету. Результатом работы данного шага является бинаризованное изображение с выделенными найденными объектами, где белым цветом обозначены пиксели, цвет которых входит в искомый диапазон. Пример представлен на рисунке 5.



а ***б*** ***в***

Рис. 5. Результат работы шага цветового поиска: а – исходное изображение; б – бинаризованное изображение, в – совмещенное демонстрационное изображение

Как видно на примере на предыдущем рисунке выделение по цвету работает не идеально. Некоторыми моментами можно пренебречь (например, неровными краями), а нейтрализации более существенных (например,

черной области внутри объекта или множества разрозненных белых пикселей, которые не принадлежат основному объекту) посвящены последующие итерации. Также, в данной информационной системе, как было упомянуто, предусмотрена возможность поиска по нескольким цветовым диапазонам параллельно. Демонстрация данной функции представлена на рисунке 6.



Рис. 6. Пример поиска по нескольким цветовым диапазонам

Для этого внешней системе, использующей данную информационную систему, необходимо передать словарь (в данном контексте словарь – одна из структур данных языка Python) с минимальными и максимальными значениями для нескольких диапазонов, как в примере ниже на рисунке 7.

```
color_ranges = {"red": {"min": (0, 132, 0), "max": (179, 255, 255)},
"green": {"min": (32, 50, 40), "max": (50, 255, 237)}}
```

Рис. 7. Пример словаря с параметрами цветовых диапазонов

Словарь в Python – это тип данных, представляющий собой коллекцию пар «ключ-значение», в рамках которых ключи не повторяются (также словари иногда называют ассоциативными массивами).

1.5 Удаление внутренних черных областей объектов на бинаризованном изображении. Для более удобного подбора значений для цветовых диапазонов можно использовать разработанное для этой цели специализированное ПО, не входящее в рассматриваемую информационную систему.

В результате цветового поиска, производимого разработанной системой, может получиться так, что объект, потенциально являющийся плодом томата, на бинаризованном изображении будет иметь черное пятно даже при корректной настройке диапазонов поиска. Данный эффект продемонстрирован на рисунке 8.



Рис. 8. Пример неидеального выделения по цвету

Указанный дефект изображения может повлиять на корректное разделение близко расположенных объектов из-за специфики этой операции.

Решение этой проблемы основано на нахождении внешнего контура объекта и заполнении всего пространства внутри этого контура; библиотека OpenCV предоставляет такую возможность.

Контур изображается ломаной линией, вершины которой называются узлами; предположим, даны две линии - эталонная и тестового объекта. Сравним объекты с помощью следующей модели. Предположив, что оба объекта сделаны из проволоки, сравним близость этих ломаных линий, оценив количество механической работы, необходимой для превращения одного объекта в другой. Определим элементарную работу, которую надо совершить для перевода отдельных прямолинейных элементов ломаных. Достаточно рассмотреть два основных вида деформации: растяжение (сжатие) и изгиб в узлах.

Назначим элементарную работу для каждой из этих деформаций:

$f(l_1 - l_2)$ – работа по изменению длины при растяжении и сжатии,

$f(\varphi_1 - \varphi_2)$ – работа по изменению угла при изгибе.

Задача состоит в поиске такого преобразования, чтобы затраченная работа была минимальной, т.е. надо найти

$$f_\Sigma = \min_s. \tag{5}$$

Контур можно представить, как кривую, соединяющую все непрерывные точки вдоль границы, которые имеют одинаковый цвет или одинаковую интенсивность.

Эта задача сводится к установлению соответствия узлов одной ломаной узлам другой. При этом не требуется взаимно-однозначное соответствие, но требуется сохранение монотонности.

Для большей точности с разработанной информационной системе используются двоичные изображения. Данное решение основано на том, что в OpenCV поиск контуров заключается в поиске более светлого объекта на фоне более темного [7,8]. Пример найденного контура приведен на рисунке 9 (в целях демонстрации контур выделен зеленым цветом).



Рис. 9. Пример найденного внешнего контура объекта.

Как только контур найден, для удаления внутренних чёрных областей объектов на бинаризованном изображении можно использовать метод пороговой обработки с двойным ограничением ($t_1 < t_2$). Он основан на сравнении каждого пикселя с двумя порогами: верхним (t_1) и нижним (t_2). Если значение пикселя меньше нижнего порога, оно устанавливается равным нулю (белый цвет). Если значение пикселя больше верхнего порога, оно также устанавливается равным нулю (белый цвет). В противном случае пиксель остаётся чёрным (тёмный цвет).

Формула метода пороговой обработки с двойным ограничением:

$$F'(m,n) = \begin{cases} 0, & F(m,n) > t_1 \\ 1, & F(m,n) < t_2 \end{cases}, \quad (6)$$

где F′(m, n) – преобразованное изображение, F(m, n) – исходное изображение, t1 и t2 – пороги.

В результате все пространство внутри контура заполняется белым цветом. На рисунке 10 ниже показан пример того же изображения, что и в предыдущем методе удаления черных областей с объектов на бинаризованном изображении.



Рис. 10. Результат закрашивания черных областей у объектов с применением поиска контуров

При сравнении рисунков 8 и 10 можно увидеть, что на втором примере внешние контуры объектов никак не деформированы, и на основе этого при разработке было принято решение использовать метод закрашивания с поиском контуров в рассматриваемой информационной системе.

1.6 Разделение соприкасающихся объектов на бинаризованном изображении. При анализе требований к проектируемой информационной системе было выявлено, что зачастую могут происходить случаи, когда несколько объектов, обладающие искомым цветом и близко расположенные, соприкасаются и, тем самым, частично или полностью перекрывают друг друга. Результатом этого является, что на бинаризованном изображении такие объекты сливаются в одну большую белую область, как на рисунке 11.



Рис. 11. Слившееся в один большой объект томаты, слишком близко расположенные относительно друг друга

Попытка распознавания разработанной системы вышеприведенного изображения без предварительного разделения объектов приведет к тому, что в итоге будет распознан только один объект или вовсе ни одного (т.к. форма получившейся белой области имеет мало общего с формой плода томата). Для решения этой задачи был рассматрен способ – алгоритм водораздела (англ. Watershed Algorithm).

Первым шагом в применении алгоритма водораздела в разработанной информационной системе для сегментации является построение карты расстояний для бинаризованного изображения, как рисунке 12.

Карта расстояний основывается на евклидовом преобразовании расстояния (англ. Euclidean Distance Transform – EDT). Представленная на рисунке 14 карта является демонстрацией EDT. Для построения описанной карты использовалась функция distance_transform_edt библиотеки Scipy.

Евклидово расстояние между двумя точками p и q в n-мерном пространстве определяется формулой:

$$d(p,q) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(p_i - q_i)^2}. \quad (7)$$

где pi и qi – координаты точек p и q соответственно, а Σ обозначает сумму по всем измерениям.

Следующий шаг - поиск локальных максимумов полученной карты расстояний. Эти точки представляют собой центры предполагаемых объектов, с которых непосредственно начинается сегментация объекта ("заполнение

водой", описанное выше). Для поиска локальных максимумов используется функция peak_local_max из библиотеки Skimage. Результатом работы этой функции является бинаризованное изображение для каждого отдельного объекта (сегмента исходного объекта), найденного алгоритмом водораздела. Пример показан на рисунке 13.

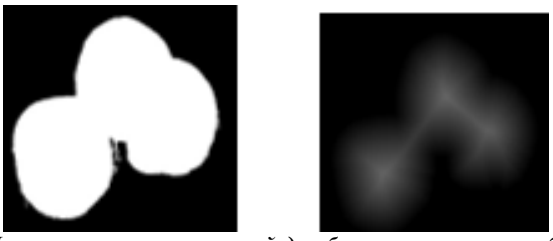


Рис. 12. Пример карты расстояний для бинаризованного изображения



Рис. 13. Сегменты исходного объединенного объекта

Полученные в результате вышеописанной сегментации объекты будут отдельно проанализированы на шаге фильтрации по внешней геометрической форме.

Стоит отметить, что данная итерация требует больших вычислений и, следовательно, требует большего времени. Если необходимо повысить скорость работы рассматриваемой системы и известно, что плоды томатов на исходных изображениях с высокой вероятностью не соприкасаются, то в разработанной информационной системе предусмотрена возможность отключения шага разделения частично перекрывающихся объектов (и вместе с ним шаг удаление черных областей объектов. Отключение происходит на шаге передачи исходных материалов для распознавания.

1.7 Фильтрация объектов по внешней геометрической форме на биноризованном изображении. Последним шагом работы разработанной информационной системы является поиск на изображениях, полученных на предыдущих итерациях, объектов, форма которых схожа с формой плода томата.

Существует несколько подходов решения данной задачи с применение средств библиотеки OpenCV. Нами выбран подход связанный с использованием simple blob detector, входящего в состав библиотеки OpenCV. Именно данный метод применяется в разработанной информационной системе. Он позволяет находить на изображении области, имеющие общее свойство (в контексте компьютерного зрения такая область называется «blob») по следующим ключевым характеристикам:

цвет;
минимальное расстояние между центрами областей;
площадь (минимальное и максимальное значения);
округлость (минимальное и максимальное значения);
выпуклость (минимальное и максимальное значения);
инерция (минимальное и максимальное значения) [6].

Установка параметров производится перед созданием экземпляра детектора путем присвоения соответствующим полям класса SimpleBlobDetector_Params выбранных значений и булевых переменных для активации соответствующих фильтров [7-9]. Рассмотрим действия, производимые в данном алгоритме, подробнее.

Для начала необходимо создать сам экземпляр класса SimpleBlobDetector_Params, содержащего все настройки для дальнейшей фильтрации объектов детектором (simple blob detector). Важной и не совсем очевидной особенностью данного класса является то, что некоторые фильтры включены заранее и для последующей корректной работы с рассматриваемым детектором необходимо проследить, чтобы все фильтры, которые не планируется использовать, были выключены.

Следующим шагом, является отключение фильтра по цвету. Данный фильтр не понадобится для дальнейшего анализа объектов, поскольку выделение по цвету в данной разработанной информационной системе производилось на шаге цветового поиска.

Следующий шаг – включение фильтра по площади и загрузка минимального и максимального значений площади искомых объектов. Фильтр по площади применяется для фильтрации слишком малых или, напротив, слишком больших объектов. Диапазон искомых площадей в разработанной информационной системе рассчитываются на основе размеров исходного изображения. Это необходимо, поскольку объекты с абсолютными значениями площадей будут обладать разными относительными размерами на изображения с разными разрешениями. Для использования в разработанной информационной системе было принято решение использовать значения от 1/225 до 1/2,25 значений площади исходного изображения.

Последующими шагами являются включения и загрузка минимальных значений фильтров округлости, выпуклости и инерции. Значения данных фильтров были вычислены экспериментальным путем и равны 0,6, 0,5, 0,4 соответственно. Характеристики, используемые данными фильтрами, требуют отдельного пояснения.

Округлость – метрика, позволяющая определить, насколько фигура геометрической формой близка к окружности. Т.е. правильный шестиугольник имеет большую округлость, чем квадрат. Числовое значение округлости определяется по формуле [10-12].

$$C = \frac{4\pi S}{(P)^2} \quad (8)$$

где: C – округлость; S – площадь; P – периметр.

Рассмотрим два крайних значения для данного свойства. Наиболее лучшее значение должно быть для круга, оно равно

$$C = \frac{4\pi S}{(P)^2} = \frac{4\pi \cdot \pi R^2}{(2\pi R)^2} = \frac{4\pi^2 R^2}{4\pi^2 R^2} = 1. \quad (9)$$

Наиболее худший вариант (наименьшая “округлость”) наблюдается у квадрата. Соответствующее значение равно

$$C = \frac{4\pi S}{(P)^2} = \frac{4\pi \cdot a^2}{(4a)^2} = \frac{4\pi a^2}{16a^2} = \frac{\pi}{4}. \quad (10)$$

Из данной формулы следует, что круг имеет округлость равной 1, а округлость квадрата равна 0,785.

Числовое значение выпуклости вычисляется путем деления площади фигуры на площадь ее выпуклой оболочки [13-14]. Выпуклая оболочка фигуры – это наименьшая выпуклая геометрическая фигура, которая полностью охватывает исходную фигуру. Таким образом, значение выпуклости принадлежит множеству от 0 до 1.

Коэффициент инерции (энергия изгиба) показывает, насколько вытянута геометрическая фигура. Для наглядности на рисунке 14 изображены примеры фигур с разными коэффициентами инерции (зеленая фигура справа имеет меньшим коэффициентом, чем синяя справа) [15].



Рис. 14. Пример фигур с разными коэффициентами инерции

Пусть задано n точек фигуры, тогда энергия изгиба описывается следующей формулой:

$$E(n) = \frac{1}{P}\sum_{i=0}^{n-1} |k_i|^2, \quad (11)$$

где $k_i = \theta_{i+1} - \theta_i$ и $\theta_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$. k_i характеризует изменение угла в вершине.

Для круга данный коэффициент равен 1, для эллипса – от 0 до 1, а для линии – 0.

После проведения вышеописанной настройки необходимо создать экземпляр класса SimpleBlobDetector, передав класс с настройками SimpleBlobDetector_Params в конструктор. Для применения детектора следует вызвать метод detect данного класса.

Стоит отметить, что в разработанной информационной системе имеется возможность изменить параметры детектора путем передачи класса SimpleBlobDetector_Params с соответствующими настройками вместе с исходным изображением на шаге вызова инициализирующей функции рассматриваемой системы.

1.8 Распознавание плода томата при оптимальных условиях и при зашумленном изображении. На рисунке 15 ниже изображены два плода томата. Можно утверждать, что данная фотография произведена при оптимальных условиях. Поскольку:

исходное изображение не зашумлено;

оптимальное освещение сцены (не резкое и не имеющее больших смещений в холодные или теплые тона);

плоды не повреждены;

плоды находятся на достаточном удалении друг от друга и не соприкасаются.



Рис. 15. Тестовое изображения для распознавания в оптимальных условиях

Распознаванию плодов при таких внешних условиях ничего не препятствует и плоды томатов распознаются с достаточно большой точностью, как на рисунке 16.



Рис. 16. Результат распознавания при оптимальных условиях

Как видно на итоговом демонстрационном изображении, два плода томата были найдены (и впоследствии выделены) корректно.

В качестве тестового изображения для распознавания плода томата в условиях зашумленности будет использоваться тестовое изображение с искусственно наложенными шумами.

Для лучшей демонстрации шумов, был взят увеличенный фрагмент изображения. Как можно заметить, на изображении присутствует довольно сильная зашумленность. Данные шумы сильно не влияют на опознавание на данном изображении плода томата человеком, но в процессе распознавания методами компьютерного зрения точность можешь значительно упасть.

Удаление шумов с изображения включает использование метрики PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) для оценки качества шумоподавления. Метрика PSNR определяется следующим образом:

$$PSNR = \frac{MAXI - |D|}{\frac{L}{MAXI \cdot 10^{10}}}, \quad (12)$$

где MAXI – максимальное значение пикселя изображения, D – разность между исходным и обработанным изображением, L – количество бит на пиксель. Таким образом, чем ближе отфильтрованное изображение к оригинальному, тем больше значение PSNR и тем выше считается качество работы алгоритма шумоподавления.

Данная метрика определяет уровень искажений при сжатии и включает подсчёт среднеквадратичной ошибки (MSE). PSNR измеряется в логарифмической шкале в децибелах и имеет диапазон значений от 0 до 100. Т.е. чем выше значение PSNR, тем больше деталей осталось на изображении после сжатия и выше качество.

Среднеквадратичная ошибка (MSE) подсчитывается по формуле:

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - 'y_i)^2, \quad (13)$$

где n — количество пикселов, y_i — фактические значения пикселя изображения, а $'y_i$ — предсказанные значения.

Как продемонстрировано на предыдущем рисунке система отработала корректно и были распознаны все плоды томатов на изображении.

Рассмотрим воздействие зашумленности изображение подробнее. На рисунке 17 представлено сравнение фрагментов бинаризованных изображений, на которых изображен найденный плод томата при разных условиях.



Рис. 17. Бинаризованные изображения плода томата при распознавании в оптимальных условиях (слева), в условия зашумленности исходного изображения без сглаживания (в середине) и в условия зашумленности исходного изображения со сглаживанием (справа)

На продемонстрированных выше примерах представлены негативное влияние зашумленности исходного изображения и следующая из этого необходимость борьбы с ней. Зашумленность может привести к некорректной работе детектора, фильтрующего объекты по форме их бинаризованного изображения.

Результатом некорректной работы с зашумленным изображением с отсутствующим сглаживанием в данном случае привел к неспособности разработанной информационной системы распознать на изображении плоды томатов.

1.9 Распознавание плода томата на изображении с некорректным балансом белого цвета. Для моделирования ситуации с анализом изображения с неправильными настройками цветового баланса используется представленное на рисунке 18 исходное изображение со смещенными цветами в сторону более теплых оттенков.



Рис. 18. Тестовое изображения с некорректным цветовым балансом

Как видно на приведенном рисунке, цвет объектов на изображении исказился (оттенок красных плодов томатов сместился ближе к оранжевому). Данный фактор может повлиять на корректную работу поиска по цвету. Для нейтрализации негативных последствий данного фактора проводится коррекция баланса белого. Демонстрация результата работы разработанной информационной системы представлен на рисунке 19.



Рис. 19. Результат анализа изображения с некорректным цветовым балансом

Как можно увидеть на приведенном рисунке разработанная информационная система успешно распознала томаты с искаженным цветом.

1.10 Распознавание нескольких соприкасающихся плодов томата на изображении. Существует проблематика процедуры разделения и распознавания нескольких частично перекрывающихся объектов на изображении.

В качестве исходного демонстрационного изображения в данном разделе будет рассматриваться рис. 20.



Рис. 20. Тестовое изображение с несколькими частично перекрывающимися плодами томатов

На данной фотографии присутствуют несколько перекрывающих друг друга плода томата. Распознать на данном изображении четыре плода томата для человека не составляет больших трудностей. Но в контексте компьютерного зрения это довольно распространенная задача. Проблема распознавания таких групп заключается в том, что на бинаризованном изображении все данные объекты по причине того, что у них всех схожие цвета, образуют единый большой белый объект, как на рисунке 21.



Рис. 21. Бинаризованное изображение, полученное на основе исходного

Для решения подобных задач в разработанной информационной системе используется алгоритм водораздела. Рассматриваемое изображение, продемонстрированное на рисунке 26 необходимо подготовить перед применение алгоритма водораздела.

Подготовка бинаризованного изображения подразумевает удаление (закрашивание) черных областей, находящихся в пределах белого объекта на подготавливаемом изображении. После данной подготовки можно приступать к сегментации алгоритмом водораздела. Результат решения поставленной задачи продемонстрирован на рисунке 22.



Рис. 22. Результат анализа изображения с несколькими частично пересекающимися плодами томата

На продемонстрированном выше изображении видно, что разработанная информационная система корректно определила все четыре плода томата. Стоит отметить, что рассматриваемая информационная система с большой долей вероятности определяет только те плоды томатов, у которых скрытая часть не превышает примерно половины плода. В противном случае точность распознавания резко уменьшится.

1.11 Распознавание плода томата на изображении, на котором присутствуют посторонние предметы. Зачастую на изображении присутствуют не только плоды томатов, а разного вида посторонние объекты (не учитывая фоновый объект). Как пример, рисунок 23

Объекты с нехарактерными для плодов томата цветами фильтруются на шаге поиска по цвету и поэтому не могут присутствовать на итоговом бинаризованном изображении и не вызывают больших трудностей на последующих итерациях анализа такого изображения. Проблему вызывают те объекты, чьи цвета входят в искомый диапазон. Бинаризованные изображения данных объектов необходимо отсортировывать по другим параметрам. Такими параметрами могут быть свойства внешних геометрических форм объектов на бинаризованном изображении.

Библиотека OpenCV содержит инструменты анализа параметров геометрических фигур.Результат фильтрации с использованием таких инструментов представлен на рисунке 24.



Рис. 23. Тестовое изображение с посторонними объектами.



Рис. 24. Результат анализа изображения с присутствующими на нем посторонними предметами

Стоит отметить, что данный подход не защищает от ошибочного распознавания как плод томата объектов, очень схожих цветом и внешней формой с плодом томата (например, красный шар).

1.12 Распознавание плодов томата разных цветов на одном изображении. Для правильной классификации на основе цвета плода томата (например, классификация по стадиям созревания или по сортам), необходимо искать объекты на изображении сразу нескольких цветовых диапазонов. Рассмотрим пример следующей ситуации, изображенной на рисунке 25. На рисунке изображены два плода томата различных сортов. Стоит необходимость классифицировать данные плоды по сортам на основе их внешнего цвета и произвести подсчет их количества.

Для выполнения поставленной задачи в разработанной информационной системе последовательно производится поиск и формирование бинаризованных изображений для каждого цветового диапазона (соответствующему отдельному сорту). Далее каждое бинаризованное изображение обрабатывается отдельно и для каждого цветового диапазона формируются списки найденных объектов.



Рис. 25. Тестовое изображение с несколькими плодами томата разных сортов

Демонстрация результата работы разработанной информационной системы представлена на рисунке 26.



Рис. 26. Результат анализа изображения с несколькими плодами томата разных сортов с классификацией их по сортам

Количество распознанных плодов томата можно получить, основываясь на длине списка с информацией о найденных объектах, возвращаемого разработанной информационной системой по окончании анализа изображения.

Точность распознавания плодов томатов разработанной информационной системы напрямую зависит от качества изображения и от того, насколько внешний вид плода томата не искажен на изображении. Из этого следует, что если объект обладает формой или цветом слишком нехарактерными для плодов томата (например, плод поврежден), то такой плод, наиболее вероятно, не будет распознан на изображении.

В эту категорию можно также отнести плоды, чья внешняя геометрическая форма бинаризованного изображения, полученного на шаге цветового поиска, искажена.

На примере выше изображены плоды томатов, перекрываемые стеблем и листьями. Поскольку данные перекрывающие объекты обладают другим цветом, они не присутствуют на итоговом бинаризованном изображении и на их месте расположены черные области. Из-за этого бинаризованное изображение плода оказывается разделенным на несколько частей. В следствие этого, каждая такая часть анализируется отдельно, что и приводит к ошибочному распознаванию. Точность распознавания разработанной информационной системы значительно снижается при перекрывании посторонними объектами плодов томатов. Для достаточно точного распознавания необходимо избегать визуального разделения плода томата на изображении.

Заключение. В данной статье были приведены примеры распознавания объектов, цветом и внешней формой схожих с плодами томата. Были продемонстрированы результаты работы методов минимизации последствий факторов, негативно влияющих на анализ изображения с целью поиска на нем плодов томата. Описаны слабые стороны разработанной информационной системы.

На основе материалов данной статьи можно сделать выводы. Разработанная информационная система мониторинга количества плодов томатов корректно решает следующие поставленные задачи:

корректное распознавание плодов томата в условиях зашумленности изображения;

корректное распознавание плодов томата при разных условиях освещения;

корректное распознавание соприкасающихся и частично перекрывающихся плодов томата;

корректную фильтрацию посторонних предметов, не обладающих особенностями внешнего вида плодов томата;

корректную классификацию плодов томата основываясь на внешнем цвете

Также стоит обратить внимание на слабые стороны данной информационной системы:

Возможное некорректное распознавание излишне перекрытого (скрытого порядка наполовину) посторонним объектом плода томата (в данном случае скрытый плод наиболее вероятно будет распознан как часть плода на переднем плане);

Возможное некорректное распознавание визуально разделенного плода томата посторонним объектом на изображении (в данном случае плод наиболее вероятно будет распознан как несколько раздельных объектов).

Важно учитывать слабые стороны разработанной информационной системы и по возможности не допускать вышеперечисленные ситуации.

Следует также подчеркнуть, что разработанная информационная система построена с использованием алгоритма компьютерного зрения таким образом, что в ней не применялись нейронные сети (обучение по примерам) что можно выделить в преимущество так как для настройки на поиск необходимого объекта не нужно искать существенно большой массив изображений. Такой подход в разработке информационной системы, на наш взгляд, является более приемлемый для сельского хозяйства.

Список литературы

1. Боргоякова В.А. Разработка информационной модели автоматизации теплицы // Международный студенческий научный вестник. 2019. №1. С. 30-38.

2. Потапов В.И. Использование нейронной сети для построения краткосрочного прогноза электропотребления ООО "Омская энергосбытовая компания" / В. И. Потапов, А. С. Грицай, Д. А. Тюньков, Г. Э. Синицин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 8. С. 44-51.

3. ГОСТ 1725-85. Томаты свежие. Технические условия. М.: Издательство стандартов. М., 1985.

4. Использование компьютерного зрения в тепличном хозяйстве / А.В. Шимохин, Е.Ф. Романова, И.Ф. Ричапов, О.В. Краснов // Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях: Сборник международной научно-исследовательской конференции, посвященной 70-летию создания факультета ТС в АПК (МЕХ ФАК). Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2020. С. 334-339.

5. Использование нейронной сети для построения краткосрочного прогноза электропотребления ООО "Омская энергосбытовая компания" / В. И. Потапов, А. С. Грицай, Д. А. Тюньков, Г. Э. Синицин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 8. С. 44-51.

6 Устюжанин С.А. АСУ «УМНАЯ ТЕПЛИЦА» / Устюжанин, С.А., Симахин В.А. // Математическое и информационное моделирование. 2017. С. 472-478.

7. Амонуллозода О.А. Методы расспознавания объектов по изображению при помощи библиотеки opencv // Вестник Технологического университета Таджикистана. 2019. № 1(36). С. 73-80. EDN HTMDAJ.

8. Кравцов Е.А. Контурный анализ с использованием библиотеки opencv // Медико-экологические информационные технологии - 2020: сборник научных статей по материалам XXIII Международной научно-технической конференции: в 2 ч. Том Часть 2. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 143-149.

9. Магамедова Д.М. OpenCV - инструмент компьютерного зрения // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 63-3. С. 42-48. DOI 10.18411/lj-07-2020-68.

10. Харитонов А.С. Автоматизация теплицы на базе одноплатного компьютера RaspberryPi и графического конфигуратора Node-RED // Наука настоящего и будущего. 2017. С. 120-122.

11. Шимохин А.В. Применение нейросетевого моделирования для принятия решения о передаче бизнес-процесса на аутсорсинг// Фундаментальные исследования. 2019. № 5. С. 160-166.

12. Chlorophyll fluorescence, non-photochemical quenching and light harvesting complex as alternatives to color measurement, in classifying tomato fruit according to their maturity stage at harvest and in monitoring postharvest ripening during storage / S.Dimitrios, Kasampalis, Pavlos Tsouvaltzis, Anastasios S. Siomos // Postharvest Biology and Technology.- Volume 1612020, 111036. DOI 10.1016/j.postharvbio.2019.111036.

13. Sharpening based on multi-objective decision for multi-band remote sensing images/ Lei Wu Pan, Yunqiang Yin, Xunyan Jiang, T.C.E. Cheng // Pattern Recognition, Volume 118, 2021, 108022. DOI 10.1016/j.patcog.2021.108022.

14. Sharpening enhancement technique for MR images to enhance the segmentation / Jeevakala S.,,Brintha Therese A. // Biomedical Signal Processing and Control, Volume 41, 2018. P. 21-30. DOI: 10.1016/j.bspc.2017.11.007.

15. Шипко В.В. Метод селекции объектов на гиперспектральном изображении на основе анализа их контуров / В.В. Шипко, М.Ф. Волобуев // Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130, № 8. С. 1248-1255. DOI 10.21883/OS.2022.08.52911.3268-22.

16. On Plant Detection of Intact Tomato Fruits Using Image Analysis and Machine Learning Methods/ Yamamoto, Kyosuke & Guo, Wei & Yoshioka, Yosuke & Ninomiya // Sensors. 2014. №14. С. 12191-12206.

Грицай Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, aleksandr.gritsay@gmail.com, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Шимохин Антон Владимирович, старший преподаватель, av.shimokhin@omgau.org, Россия, Омск, Омский государственный аграрный университет,

Лучинович Анастасия Александровна, магистр, ассистент, aa.luchinovich@omgau.org, Россия, Омск, Омский государственный аграрный университет,

Болтовский Сергей Николаевич, магистр, ассистент, sn.boltovskiy@omgau.org, Россия, Омск, Омский государственный аграрный университет,

Симоненко Александр Евгеньевич, магистр, ассистент, alexsim99.99@mail.ru Россия, Омск, Омский государственный аграрный университет,

Червенчук Игорь Владимирович, канд. техн. наук, доцент, cherven-igor@yandex.ru, Россия, Омск, Омский государственный аграрный университет

INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING THE NUMBER OF FRUIT AND THEIR CONDITION USING COMPUTER VISION TECHNOLOGY

A.S.Gritsay, A.V. Shimokhin, A.A. Luchinovich, S.N. Boltovsky, A.E. Simonenko, I.V. Chervenchuk

In the article, the main goal of the designed information system is to recognize plant fruits in a digital image with subsequent classification based on previously known color ranges [1,2]. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: minimizing the possible negative effects of distortion of the original image and analysis of the image in order to search for tomato fruits on it.

Key words: crop production, computer vision, greenhouse automation.

Gritsai Alexander Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, aleksandr.gritsay@gmail.com, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Shimokhin Anton Vladimirovich, senior lecturer, av.shimokhin@omgau.org, Russia, Omsk, Omsk State Agrarian University,

Luchinovich Anastasia Alexandrovna, master's, assistant, aa.luchinovich@omgau.org, Russia, Omsk, Omsk State Agrarian University,

Boltovsky Sergey Nikolaevich, master's, assistant, sn.boltovskiy@omgau.org, Russia, Omsk, Omsk State Agrarian University,

Simonenko Alexander Evgenievich, master's, assistant, alexsim99.99@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Agrarian University,

Chervenchuk Igor Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, cherven-igor@yandex.ru, Russia, Omsk, Omsk State Agrarian University

УДК 004.94
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-287-288

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ MAXIMA ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

И.М. Слабженникова

В работе описано применение численных методов Эйлера и Рунге-Кутта четвёртого порядка для решения обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Решена задача для системы с одной степенью свободы. Показано, что свободная система компьютерной алгебры Maxima применима для численных и аналитических расчетов электрических цепей и описания процессов в них.

Ключевые слова: моделирование, обыкновенное дифференциальное уравнение, заряд конденсатора, система компьютерной алгебры Maxima.

Исследование физических процессов не обходится без построения их моделей. Модель необходима для того, чтобы объяснить явление, найти законы и закономерности.

Моделирование применяется в промышленности для конструирования промышленного оборудования [1 - 3], транспортных средств [4], бытовой техники [5], при создании новых технологий [6], в научных исследованиях [7, 8] и образовательном процессе [9].

В начале исследования создается простая модель, которая позволяет качественно описать физический процесс. По мере изучения явления модель усложняется таким образом, что она позволяет не только описать явление, но и получить количественный результат. Любой количественный результат имеет ошибку, которая определяется несовершенством модели и вычислительной ошибкой метода расчета. Для уменьшения ошибки вычисления применяются различные численные методы решения дифференциальных уравнений для поиска наиболее оптимального в решении конкретной задачи.

В конечном итоге результаты исследования модели распространяются на реальную физическую систему или процесс.

Часто для решения физической задачи необходимо записать и решить обыкновенное дифференциальное уравнение (ОДУ) первого порядка

$$y' = f(x).$$

Самым простым методом решения ОДУ является метод Эйлера или метод касательных. Метод Эйлера состоит в пошаговом применении конечно-разностного уравнения [10]

$$\begin{cases} y_{i+1} = y_i + f(x_i)\Delta x, \\ x_{i+1} = x_i + \Delta x, \\ (i = 0,1,2,3,...) \end{cases}$$

при начальных значениях x_0 и y_0. Он дает хорошее приближение только при малых значениях Δx и только для нескольких первых точек.

Лучшие результаты можно получить, если применить метод Рунге-Кутта четвертого порядка. Этот метод является самостартующим, поэтому его применяют для вычисления нескольких первых точек несамостартующих алгоритмов [10].

ОДУ первого порядка

$$y' = f(x, y)$$

решается численно при начальном условии

$$y_0 = y(x_0)$$

по формулам

$$x_k = x_0 + k\Delta x, (k = 1,2,3,...),$$

$$K_1 = f(x_{k-1}, y_{k-1})\Delta x,$$

$$K_2 = f\left(x_{k-1} + \frac{\Delta x}{2}, y_{k-1} + \frac{K_1}{2}\right)\Delta x,$$

$$K_3 = f\left(x_{k-1} + \frac{\Delta x}{2}, y_{k-1} + \frac{K_2}{2}\right)\Delta x,$$

$$K_4 = f(x_{k-1} + \Delta x, y_{k-1} + K_3)\Delta x,$$

$$y_k = y_{k-1} + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4),$$

где

$$y_k = y(x_k), y'_k = y'(x_k).$$

Решим задачу для системы с одной степенью свободы. Задача состоит в вычислении зависимости заряда конденсатора от времени. Применение конденсаторов в электрических цепях является причиной возникновения переходных процессов. Это обусловлено тем, что энергия электрического поля конденсатора не может изменяться скачком при коммутации в электрической цепи.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника постоянного напряжения U, резистора сопротивлением R и конденсатора ёмкостью C, включённых последовательно (рис. 1).

Сила тока на всех участках цепи одинакова, так как элементы цепи соединены последовательно. В цепь включен источник постоянного напряжения, поэтому применим закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$RI(t)+\frac{Q(t)}{C}=U\ ,$$

или

$$R\frac{dQ(t)}{dt}+\frac{Q(t)}{C}=U\ , \tag{1}$$

где $I(t)$ - сила тока; $Q(t)$ - заряд конденсатора; t - время.

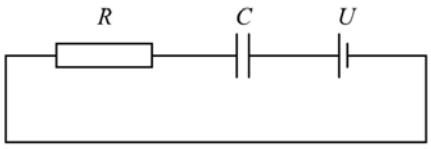


Рис. 1. Схема электрической цепи

ОДУ (1) преобразуем к ОДУ метода Эйлера

$$\dot{Q}(t)=f(t), \tag{2}$$

$$f(t)=\frac{\left[U-\frac{Q(t)}{C}\right]}{R}.$$

Для решения приведенных обыкновенных дифференциальных уравнений применим свободно распространяемую среду программирования Maxima. Например, в работе [11] показано, что основной особенностью системы компьютерной алгебры Maxima является возможность получать аналитические и численные решения математических задач, используя язык программирования подобный языку *C*.

Программа, представленная в данной работе, позволяет определить точность вычисления заряда конденсатора $Q(t)$ численными методами. Для этого выполняются вычисления величины $Q(t)$ при заданных значениях интервала текущего времени T и количества вычислительных точек N в интервале T аналитическим и численными методами. В конце программы рассчитанные значения сравниваются.

```
assume(R>0); /*сопротивление резистора положительное*/
assume(C>0); /*емкость конденсатора положительная*/
R*'diff(Q,t)+Q/C=V; /*уравнение (1)*/
ode2(%,Q,t); /*решение уравнения (1)*/
ic1(%,t=0,Q=0); /*решение задачи Коши*/
rhs(%); /*извлекаем правую часть решения*/
rh:expand(%); /*раскрыть скобки*/
Qt(t):="rh; /*определить функцию Q(t)*/
R:2000$ C:10^(-6)$ V:10; /*характеристики элементов цепи*/
T:0.005; /*интервал текущего времени*/
N:100; /*количество вычислительных точек в интервале текущего времени*/
dx:float(T/(N-1)); /*длина шага*/
x:makelist(0,i,1,N)$ /*массив значений текущего времени*/
y:makelist(0,i,1,N)$ /*массив значений заряда конденсатора (метод Эйлера)*/
f(Qi):=(V-Qi/C)/R; /*определение функции вычисления производной*/
for i:2 thru N do /*метод Эйлера*/
(
  x[i]:float(x[i-1]+dx),
  yi:y[i-1],
  y[i]:float(yi+f(yi)*dx)
)$
yr:makelist(0,i,1,N)$ /*массив значений заряда конденсатора (метод Рунге-Кутта)*/
for i:2 thru N do /*метод Рунге-Кутта*/
(
  yi:yr[i-1],
  K1:float(f(yi)*dx),
  K2:float(f(yi+K1/2)*dx),
  K3:float(f(yi+K2/2)*dx),
  K4:float(f(yi+K3)*dx),
  yr[i]:float(yi+(K1+2*(K2+K3)+K4)/6)
)$
display(dx,x[N],y[N],yr[N],Qt(x[N]))$ /*сравнение значений в последней точке*/
wxplot2d([discrete, x, y])$ /*график решения, найденного методом Эйлера*/
wxplot2d([discrete, x, yr])$ /*график решения, найденного методом Руге-Кутта*/
wxplot2d([Qt(t)], [t,0,x[N]])$ /*график аналитического решения*/
kill(all)$
```

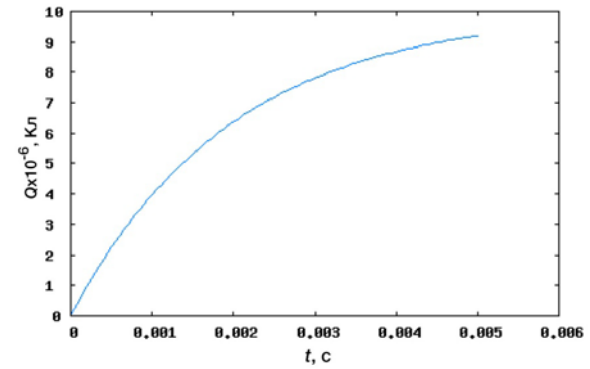
Рис. 2. Текст программы с комментариями

Алгоритм программы.

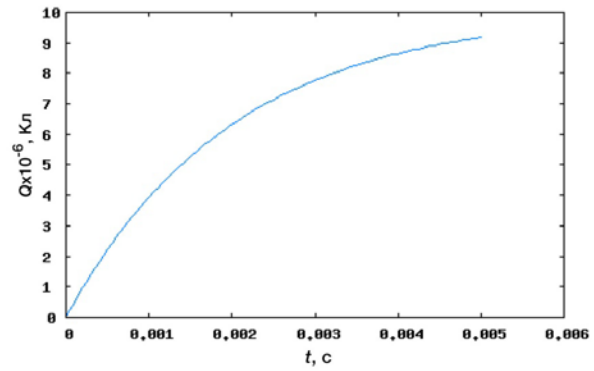
1. Утверждается, что $R > 0$, $C > 0$.
2. Записывается и аналитически решается уравнение (1).
3. На основе решения определяется функция $Q(t)$.
4. Задаются R, C, U, значение интервала текущего времени, количество вычислительных точек.
5. Вычисляется длина шага итерации (Δt).
6. Объявляются: массив значений текущего времени, массив значений заряда конденсатора для метода Эйлера.
7. Определяется функция $f(t)$ вычисления производной.
8. Решается уравнение (2) методом Эйлера.
9. Объявляется массив значений заряда конденсатора для метода Рунге-Кутта.
10. Решается уравнение (2) методом Рунге-Кутта.
11. Сравниваются значения, полученные аналитическим и численными методами в последней вычислительной точке.
12. На экран выводятся графики численных и аналитического решений.

Текст программы и комментарии к ней изображены на рис. 2.

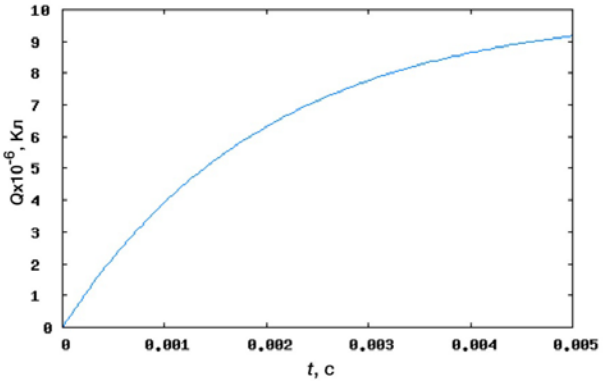
В качестве примера решается дифференциальное уравнение (1) для случая, когда конденсатор заряжается. Решение находится аналитически и численными методами Эйлера и Рунге-Кутта четвёртого порядка при условиях, что время (t) измеряется в секундах, $Q(0) = 0$ Кл, $R = 2000$ Ом, $C = 10^{-6}$ Ф и $U = 10$ В. Результаты численных и аналитического решений представляются графически в виде зависимости заряда конденсатора Q от времени t (рис. 3). Из рис. 3 следует, что графические зависимости полученные численными методами (рис. 3а, б) коррелируют с графиком, вычисленным аналитическим методом (рис. 3в).



а



б



в

Рис. 3. Графики решений, найденные: а - методом Эйлера; б - методом Рунге-Кутта четвёртого порядка; в - аналитическим методом

Из полученных расчетов можно определить точность вычисления заряда конденсатора численными методами в последней вычислительной точке (t = 0,005 с) при N = 100 из сравнения следующих значений, вычисленных программой: $9{,}205086713754059 \cdot 10^{-6}$ Кл (метод Эйлера), $9{,}1791500066589614 \cdot 10^{-6}$ Кл (метод Рунге-Кутта), $9{,}1791500137610125 \cdot 10^{-6}$ Кл (аналитический метод). Из приведенных данных следует, что заряд конденсатора, вычисленный методом Рунге-Кутта четвёртого порядка, ближе к аналитическому значению, по сравнению с зарядом, полученным методом Эйлера.

Расчеты показали, что при уменьшении длины шага итерации (Δt) решения обоими методами приближаются к аналитическому значению. В данном случае можно сказать, что рассмотренные численные методы вычислительно устойчивы.

Рассмотренный пример показал, что система компьютерной алгебры Maxima применима для численных и аналитических расчетов электрических цепей и описания процессов в них. В зависимости от выбранного численного метода расчета можно задать точность вычисления.

Благодарности. Автор выражает благодарность к.х.н., доценту Слабженникову С.Н. за помощь в разработке и написании программы в системе компьютерной алгебры Maxima.

Список литературы

1. Липов А.В., Большаков Г.С., Павловский П.Г., Мамин Р.И. Компьютерное моделирование станочного оборудования для оценки его работоспособности // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 4(24). С. 143-154.

2. Мунасыпов Р.А., Таназлы Г.И., Таназлы А.И. Особенности моделирования схем силовой электроники // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. Т. 16, № 8(53). С. 80-88.

3. Тутов С.С. Компьютерное моделирование элементов конструкций горного транспортного оборудования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 10. С. 32-34.

4. Заслонов В.В., Кравченко Н.В. Проблема применения математического моделирования в создании морских технологических комплексов (на примере БНА) // Молодой ученый. 2016. № 7(111). С. 88-90.

5. Стаценко В.В., Стаценко Д.В. Моделирование работы системы управления электроприводом бытовой техники // Colloquium-Journal. 2017. № 10(10). С. 72-75.

6. Ларин Н.В., Толоконников Л.А. Математическое моделирование неоднородного анизотропного покрытия упругой пластины с требуемыми звукоотражающими свойствами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 10. С. 188-192.

7. Вольников М.И., Смогунов В.В. Учет трения в математических моделях диссипативных систем // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 2. С. 110-118.

8. Кабиров А.Н., Вольф А.А., Забоева М.И., Аль-Хамзах А.Ф. Численное моделирование процесса образования АСПО в скважине // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические науки. 2024. № 2. С. 62-65.

9. Матиенко Л.В., Татарникова С.Р. Компьютерное моделирование в учебном процессе // Национальная ассоциация ученых. 2020. № 62-1(62). С. 35-37.

10. Лапчик М.П., Рагулина М.И., Хеннер Е.К. Численные методы. М.: Академия, 2007. 384 с.

11. Слабженникова И.М. Применение свободной системы компьютерной математики Maxima при обучении техническим наукам // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Педагогика. 2021. № 4. С. 52-59.

Слабженникова Ирина Михайловна, канд. физ.-мат. наук, доцент, imswork@mail.ru, Россия, Владивосток, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

APPLICATION OF THE MAXIMA COMPUTER ALGEBRA SYSTEM FOR SIMULATION OF PROCESSES IN ELECTRICAL CIRCUITS

I.M. Slabzhennikova

The paper describes the use of Euler and fourth-order Runge-Kutta numerical methods for solving first-order ordinary differential equations. The problem is solved for a system with one degree of freedom. It is shown that the free system of computer algebra Maxima is applicable for numerical and analytical calculations of electrical circuits and descriptions of processes in them.

Key words: modeling, ordinary differential equation, capacitor charge, Maxima computer algebra system.

Slabzhennikova Irina Mikhailovna, candidate of physical and mathematical sciences, docent, imswork@mail.ru, Russia, Vladivostok, Far Eastern State Technical Fisheries University

УДК 621.327:681.787
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-291-292

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КОГЕРЕНТНО ОГРАНИЧЕННЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Е.Е. Майоров, Ю.М. Бородянский, Р.Б. Гулиев, А.В. Дагаев, И.С. Таюрская

В работе рассмотрены источники света для когерентно-ограниченных приборов и систем. В настоящее время огромное внимание уделяется суперлюминесцентным светодиодам, потому что являются оптимальными источниками света для когерентно-ограниченной интерферометрии за счет своих технических характеристик. Применение спектрального метода для выявления пиковой длины волны излучения, ширины спектра источника, которая определяет длину когерентности значимо, поэтому настоящая работа актуальна и перспективна В работе поставлена цель и задача исследования. Приведены функциональная схема измерительной установки и блок монохроматора. Получены графические зависимости относительной спектральной чувствительности суперлюминесцентных светодиодов на разных гетероструктурах и рассчитаны длины когерентности для каждого источника света.

Ключевые слова: атомно-молекулярная структура, спектральный метод, суперлюминесцентный диод, пиковая длина волны излучения, ширина спектра, длина когерентности источника, призма Аббе, гетероструктуры.

Современное общество при познании мира опирается на разные подходы для исследования той или иной материи [1]. Познание микромира возможно с помощью такого инструмента, как спектроскопия. Спектральные приборы и системы призваны для анализа самого излучения посылаемое материей, которое несёт информацию о её строении [2]. Эти приборы и системы дают возможность изучать параметры излучения, непосредственно испускаемого физическими телами, а также исследовать результат взаимодействия с материей, которое проявляется в поглощении, отражении, рассеянии, пропускании или люминесценции излучения [3]. Итак, данный инструментарий позволяет: разложить излучение в спектр и выделить наиболее важные отдельные спектральные линии; измерить интенсивность выделенного спектра или спектральной линии [4].

Исследуя атомно-молекулярную структуру вещества можно с уверенностью констатировать тот факт, что при устойчивом состоянии атом имеет определённые значения энергии. При воздействии светового излучения на атом (поглощение кванта света) возникают переходы на более высокие уровни энергии, а при излучении атома – на более низкие [5]. Переходы соответствуют диапазону спектральных линий в спектрах поглощения и излучения атомов и молекул [6]. Спектральная линия определяет уровень энергии и внутреннее строение атома, интенсивность – о прогнозируемых переходах между уровнями. По ширине и контуру отдельной линии – температуру, при которой излучает объект [7]. Во многих научных работах по спектроскопии определено, что интенсивность спектральных линий пропорциональна числу излучаемых атомов [8]. А это означает, что по этому параметру можно определить процентное содержание отдельных элементов, входящих в состав исследуемого объекта, используя для сравнения уже известные образцы с содержанием этих элементов.

Инструментарий спектроскопии разнообразен и принято делить по оптическим характеристикам: рабочему диапазону спектра; дисперсии; диспергирующему элементу (призма, дифракционная решётка, интерферометр); светосиле (малая, средняя, большая); характеру оптики (линзовая, зеркальная); быстродействию [5-8].

В настоящее время огромное внимание уделяется таким источникам излучения, как суперлюминесцентные диоды, потому что являются оптимальными источниками света для когерентно-ограниченной интерферометрии, рефлектометрии, для различного назначения гороскопов, построеneных на квазиодномодовых оптических волокнах [9]. Уникальность этих источников света заключается в том, что они переняли определенные свойства у инжекционных лазеров и у источников белого света, использующихся в различных конструкциях оптико-электронных приборов и комплексов [10]. Многие исследователи отмечают у суперлюминесцентных диодов широкий спектр излучения, высокое оптическое усиление благодаря соединительным группам: InP, InAs, InSb, CdS, CdTe, PbSe и GaAs [11]. Суперлюминесцентные светодиоды имеют малую пространственную или временную когерентность, низкие внутренние шумы, широкий спектр излучения, центральную длину волны излучения [12].

При контроле грубых поверхностей (первого, второго класса чистоты поверхности) применяют двухлучевую интерференционную схему, где в качестве источника света используют суперлюминесцентные источники света с разными длинами волн (λ), выходными мощностями ($P_{вых.}$), длинами когерентности (l_c) и т.д [11-15]. В научной литературе многими авторами отмечается тот факт, что интерференционная картина видна в двух лучевых интерферометрах только в пределах длины когерентности источника излучения. Очевидно, что при малой l_c максимальное значение выходного оптического сигнала будет определяться точнее, чем при большой l_c, следовательно, регистрация микрорельефа поверхности будет вестись с минимальной погрешностью.

Поэтому интерес представляет исследование спектральных характеристик суперлюминесцентных светодиодов на основе многослойных гетероструктур. Конечно же существуют и другие проблемы получения суперлюминесцентного излучения, например, невозможность усиления в диоде без обратной связи, но данная проблема в работе не рассматривалась.

Выбор источника суперлюминесцентного излучения для когерентно-ограниченной интерферометрии спектральным методом и явилось целью настоящей работы.

Постановка задачи. С помощью экспериментальной измерительной установки, работающей в диапазоне длин волн от 375 нм до 1600 нм определить спектральные параметры экспериментальных образцов суперлюминесцентного излучения на основе InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP.

Материалы и метод исследования. Исследовались экспериментальные образцы суперлюминесцентного излучения на основе многослойных гетероструктур. Образцы на базе InGaAsP/InP двойной гетероструктуры раздельного ограничения с широким профилем, обладающие высокой оптической мощностью и AlGaInAs/InP с напряженно-компенсационными квантовыми ямами. Все испытуемые образцы были предоставлены одной из российских компаний-производителей источников светового излучения. Производитель нуждался в независимом контроле спектральных параметров данных образцов.

Важность использования источников суперлюминесцентного излучения в оптическом приборостроении неоценима. Данные источники излучения применяются в оптико-электронном оборудовании различного назначения, а также в лазерных комплексах. Исследователи отмечают широкое использование суперлюминесцентных диодов в оптотехнических датчиках, в различных подцветках панелей приборов, современных автоматизированных оптических приборах геометрической оптики, а также для изменения лазерного режима в интерференционных системах.

Для исследований использовалась установка, функциональная схема которой представлен на рисунке 1.

Установка для измерения спектров излучения состоит из монохроматора, фотоприемной системы, измерительного блока, где устанавливаются источники излучения и пускового блока.

Фотоприемная система состоит из линейки фотодиодов, блока питания с подключенным цифровым вольтметром. Регистрация интенсивности излучения в относительных единицах осуществляется по шкале цифрового вольтметра. Установка имела аналогово-цифровой преобразователь и через универсальный вход данные поступали на персональный компьютер, где обрабатывались и представлялись в графическом виде.

В установке использовалась модифицированная призма с рабочим диапазоном спектра 375…1600 нм.

На рисунке 2 показана оптическая схема блока монохроматора.

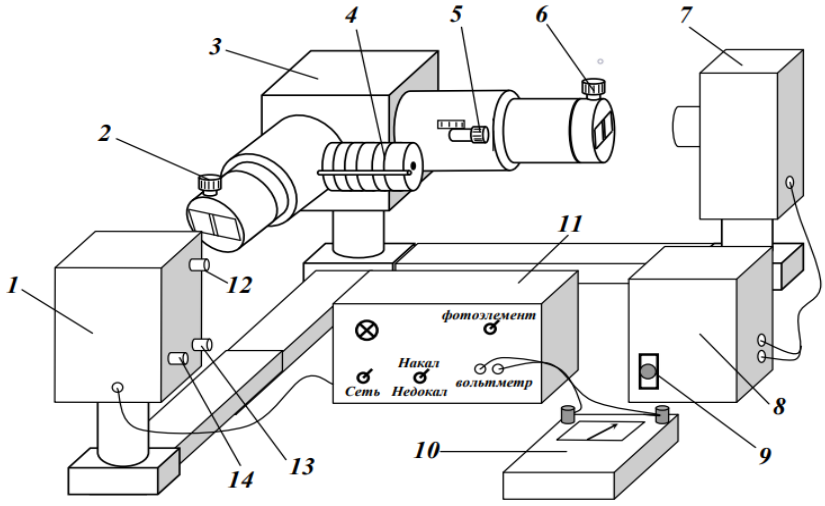


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной измерительной установки: 1 – фотоприёмное устройство; 2 – регулятор выходной щели; 3 – монохроматор; 4 – барабан; 5 – регулировка фокусировки; 6 – регулятор входной щели; 7 – источник излучения; 8 – пусковой блок; 9 – кнопка включения; 10 – измерительный прибор; 11 – блок питания; 12 – регулировка диафрагмы; 13 – установка нуля темнового тока; 14 – переключатель чувствительности измерительной системы

Входная щель (1), входной коллиматор 2, поворотная призма (3), выходной коллиматор (4), выходная щель (5). Фокусное расстояние объективов составляло 420 мм. Призма Аббе приводилась в движение барабаном.

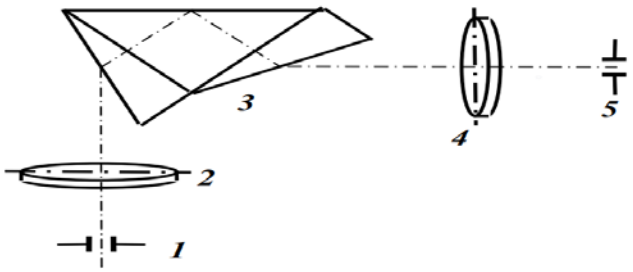


Рис. 2. Блок монохроматора: 1 – входная щель; 2, 4 – объективы; 3 – поворотная призма Аббе; 5 – выходная щель

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Для проведения эксперимента испытуемые образцы включались в специально разработанную плату, которая размещалась в измерительном блоке. На рисунках 3 и 4 получены спектры образцов.

Представленные образцы отличались составом гетероструктур, а толщина активного слоя у всех составляла 12 нм. Спектральные кривые образцов имели схожую колоколообразную форму. В работе были определены пиковые длины волн излучения λ_m а, так же ширина спектра $\Delta\lambda$ излучения. По формуле $l_c = \lambda^2_m / \Delta\lambda$ рассчитаны значения когерентности для каждого источника излучения. В таблицу сведены основные спектральные параметры излучения суперлюминесцентных светодиодов.

Таблица. Спектральные параметры источников излучения с различными составами активного слоя толщиной 12 нм.

В практическом применении у источников суперлюминесцентного излучения $P_{вых.}$ является важным параметром особенно тогда, когда речь идет о томографических измерениях. В нашем же случае $P_{вых.}$ не имеет никакого значения, потому что для при исследовании поверхности сложной формы интерференционным методом ключевую роль играет l_c.

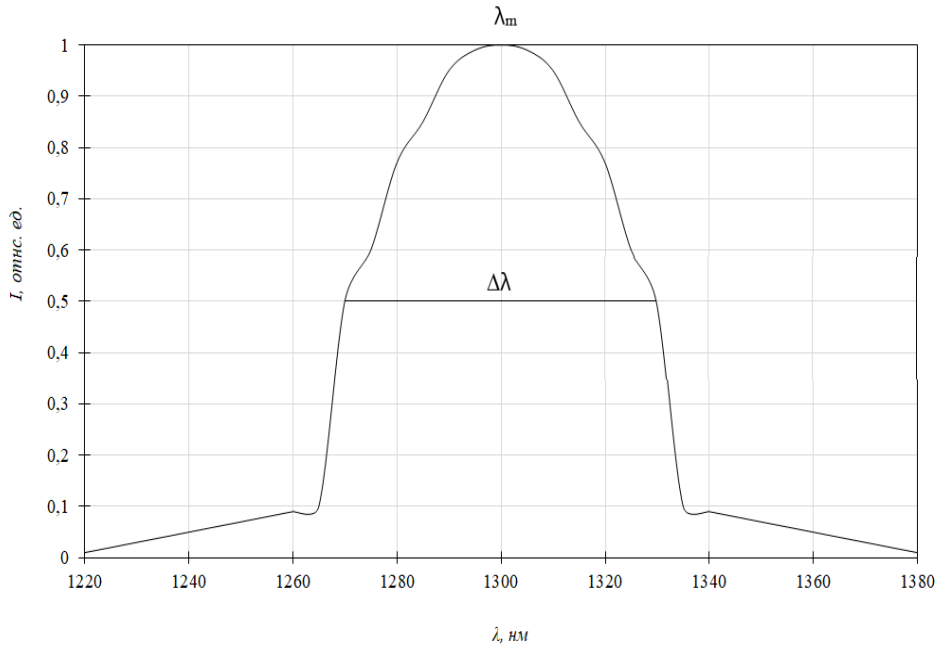


Рис. 3. Относительная спектральная чувствительность образца на основе InGaAsP/InP

Спектральные параметры экспериментальных образцов

Состав активного слоя	λ_m, нм	$\Delta\lambda$, (нм)	L_c, (мкм)
InGaAsP	1300	70	24
AlGaInAs	1550	60	40

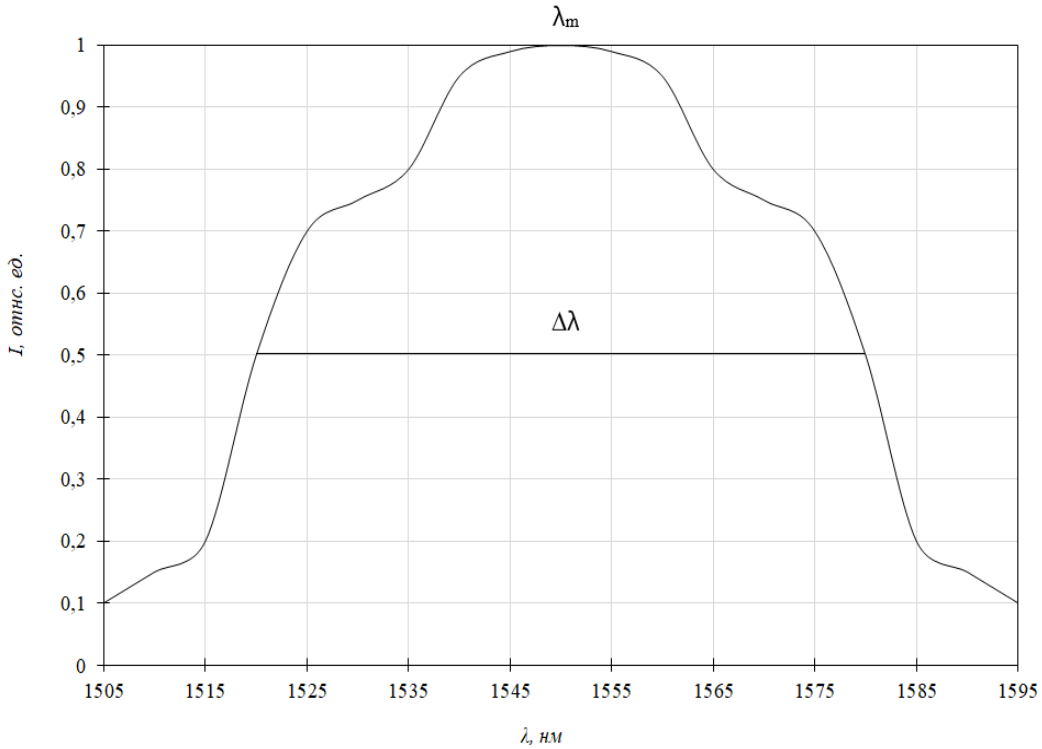


Рис. 4. Относительная спектральная чувствительность образца на основе AlGaInAs/InP

Анализируя представленную таблицу можно с уверенностью сказать, что для интерференционного метода контроля микрорельефа поверхности в качестве источника излучения оптимально подходит образец на основе InGaAsP/InP: $\lambda_m = 1300$ нм, $\Delta\lambda = 70$ нм, $l_c = 24$ мкм.

Заключение. В процессе эксперимента исследованы источники суперлюминесцентного излучения на основе многослойных гетероструктур. Получены экспериментальным путем пиковая длина волны, ширина спектра излучения и рассчитанные по ним длины когерентности источников излучения. При сравнении спектральных параметров выбран источник света, который улучшит технические характеристики интерференционных систем, работающих в низкокогерентном свете. Образец на образец на основе InGaAsP/InP: $\lambda_m = 1300$ нм, $\Delta\lambda = 70$ нм, $l_c = 24$ мкм

является оптимальным источником излучения для двухлучевого интерферометра контроля негладких поверхностей. Данные результаты работы могут представлять интерес для разработчиков интерференционных приборов и систем, работающих в низкокогерентном свете.

Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. 1970. 855 с.
2. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение. 1987. 264 с.
3. Тарасов К.И. Спектральные приборы. М.: Машиностроение. 1968. 389 с.
4. Майоров Е.Е., Курлов В.В., Бородянский Ю.М., Дагаев А.В., Таюрская И.С. Исследование голографических материалов методом спектрального анализа // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 519–524. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-519-524.
5. Майоров Е.Е., Костин Г.А., Черняк Т.А. Исследование оптических клиньев для оптических и оптико-электронных приборов и комплексов спектральным методом // Приборы. 2023. № 4. (274). С. 41-44.
6. Малакара Д. Оптический производственный контроль: пер. с англ. под ред. Соснова А.Н. М.: Машиностроение. 1985. 340 с.
7. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра. 1968. 263 с.
8. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. 640 с.
9. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Панкратов К.М., Шидловский В.Р., Якубович С.Д., Суперлюминесцентные диоды на основе двухслойных асимметричных наногетероструктур // Квантовая электроника. 2019. 49:10. С. 931–935.
10. Andreeva E.V., Chamorovsky A.Yu., Ilchenko S.N., Kostin Yu.O., Lapin P.I., Yakubovich S.D. SLD-based broad-band light sources with bell-shaped spectra in therange of 800-900 nm. Abstract Collection, 1st Symp. on OCT for Non-Destruct.Testing, Linz, Austria, 2013. P. 93-95.
11. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Якубович С.Д. Поперечно-одномодовые суперлюминесцентные диоды ближнего ИК диапазона спектра с непрерывной выходной мощностью до 100 мВт // Квантовая электроника. 2014. Т. 44(10). С. 903-906.
12. Майоров Е.Е., Костин Г.А., Черняк Т.А., Баранов Н.Е. Использование излучения с малой временной когерентностью для исследования поверхности щелевых закрылок на крыле самолета // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 7. С. 577-581. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-577-578.
13. Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Курлов В.В., Пушкина В.П., Бородянский Ю.М., Таюрская И.С. Экспериментальное исследование косметических масел низкокогерентным интерференционным радаром // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 7. С. 585-590. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-585-586.
14. Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Пушкина В.П., Дагаев А.В. Интерференционный метод в исследовании поверхности микроканалов полимерных и кварцевых микрофлюидных чипов // Приборы. 2024. №2. С. 28-32.
15. Майоров Е.Е., Костин Г.А., Курлов В.В., Баранов Н.Е. Исследование динамической поверхности летательного аппарата интерференционным методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 8. С. 722–726. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726.

Майоров Евгений Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, majorov_ee@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Бородянский Юрий Михайлович, канд. техн. наук, доцент, borodyanskyum@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

Гулиев Рамиз Балахан оглы, канд. техн. наук, доцент, ramiz63@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Дагаев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, adagaev@list.ru, Россия, Ивангород, Ивангородский гуманитарно - технический институт (филиал) Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,

Таюрская Ирина Соломоновна, канд. экон. наук, доцент, tis_ivesep@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики

RADIATION SOURCES FOR COHERENTLY LIMITED INTERFERENCE DEVICES AND SYSTEMS

E.E. Maiorov, Yu.M. Borodyansky, R.B. Guliyev, A.V. Dagaev, I.S. Tayurskaya

The paper considers light sources for coherently limited devices and systems. Currently, great attention is being paid to superluminescent leds, because they are optimal light sources for coherent-limited interferometry due to their technical characteristics. The use of the spectral method to identify the peak wavelength of radiation, the width of the source spectrum, which determines the coherence length, is significant, therefore, this work is relevant and promising. The purpose and task of the study are set. The functional diagram of the measuring unit and the mono-chromator unit are given. Graphical dependences of the relative spectral sensitivity of superluminescent LEDs on different heterostructures are obtained and the coherence lengths for each light source are calculated.

Key words: atomic-molecular structure, spectral method, superluminescent diode, peak wavelength of radiation, spectrum width, coherence length of the source, Abbe prism, heterostructures.

Maiorov Evgeny Evgenievich, candidate of technical sciences, docent, majorov_ee@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Borodyansky Yuriy Mihailovich, candidate of technical sciences, docent, borodyanskyum@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,

Guliyev Ramiz Balahan oglu, candidate of technical sciences, docent, ramiz63@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Dagaev Alexsander Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, adagaev@list.ru, Russia, Ivangorod, Ivangorodskii Humanitarian-Technical Institute (branch of) Saint-Petersburg University of Aerospace Instrumentation,

Tayurskaya Irina Solomonovna, candidate of economic sciences, docent, tis_ivesep@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg University of management technologies and Economics

УДК 004.942
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-295-296

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ВОЛНОМЕРНОГО БУЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ ВОЛНЫ

А.Г. Колесникова, В.В. Матвеев

В данной работе рассмотрены основные параметры морских волн, а также представлены различные средства для их измерения в зависимости от целей исследования. Предложено математическое описание и блок-схема алгоритма работы информационно-измерительной системы (ИИС) волномерного буя (ВБ) по определению параметров морской волны. Приводятся результаты сравнения алгоритмов с апериодическими звеньями и традиционного метода с интегрирующими звеньями по определению высоты морской волны. Представлен макетный образец ВБ с его техническими характеристиками, разработанный в лабораторных условиях.

Ключевые слова: волномерный буй, информационно-измерительная система, алгоритм, высота волны, инерциальный измерительный модуль.

Волны – это одно из самых распространённых природных явлений, которое можно встретить везде: на море, в океане, в воздухе, на суше и даже в космосе. Изучение волн имеет важное значение в науке и технике, так как они играют ключевую роль в различных процессах и явлениях.

Измерение параметров морской волны позволяет получить информацию о её характеристиках и свойствах, что может быть полезно в различных областях человеческой деятельности: обеспечение безопасности мореплавания, морская навигация, океанография, исследование океана, строительство морских сооружений, прогнозирование погоды и предупреждение о возможных опасностях.

К основным параметрам морских волн относят [1]:

1. Длина морской волны (λ) – расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одинаковой фазе: характеризует пространственный период волны (рис. 1).
2. Амплитуда морской волны (h) – максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия: характеризует максимальное значение волны.
3. Период морской волны (T) – время, за которое волна совершает одно полное колебание: характеризует скорость распространения волны.
4. Частота морской волны (ω) – количество колебаний в единицу времени: характеризует количество информации, передаваемой волной.

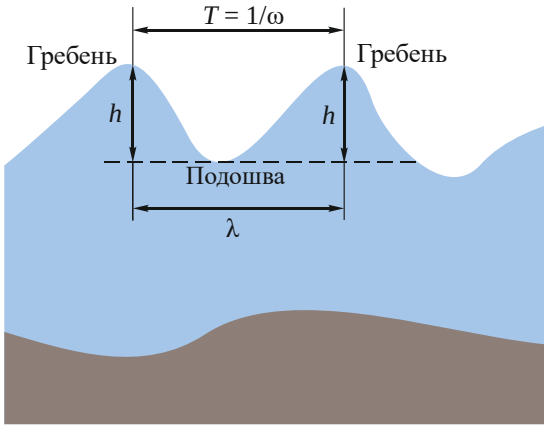


Рис. 1. Основные параметры морских волн

Инструментальные измерения элементов морских волн выполняются с помощью специальной водоизмерительной аппаратуры или волнографов, которые позволяют регистрировать величины, характеризующие волновые движения или измерять их элементы с наибольшей достоверностью [2].

В зависимости от целей исследования могут использоваться различные средства измерения параметров волн:

1. Волнографы – приборы для измерения параметров волн на поверхности моря, таких как высота, период, направление распространения и крутизна. Существует несколько типов волнографов, включая маятниковые, поплавковые, электронные и акустические.

2. Радиолокационные станции – позволяют определять параметры волн с помощью радиолокационных изображений поверхности моря. Они могут использоваться для мониторинга изменений в волновых характеристиках.

3. Волномерные буи – это устройства, которые размещаются на поверхности моря для регистрации данных о характеристиках волн. Они могут измерять высоту, период, направление распространения и другие характеристики волн.

4. Дальномеры – используются для измерения расстояния между гребнями волн. Они могут быть оптическими, лазерными и др.

Благодаря возможности интеграции с другими системами мониторинга и управления, волномерные буи нашли широкое применение, так как обеспечивают непрерывную регистрацию данных о характеристиках волн [3].

Одним из важных этапов расчётно-исследовательских работ по созданию волномерных буев является разработка прототипа, однако, стоит учитывать, что создание прототипов может быть весьма затратным процессом.

В связи с этим перед началом разработки прототипа рекомендуется смоделировать алгоритм работы ВБ. Это позволит оптимизировать процесс разработки, снизить затраты на создание прототипов и повысить эффективность работы [4].

Целью настоящей статьи является разработка и моделирование алгоритма работы информационно-измерительной системы волномерного буя с устойчивым вертикальным каналом бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС).

Моделирование алгоритма работы информационно-измерительной системы волномерного буя. Уравнения алгоритма буя имеют вид:

$$\begin{cases} 2\dot{\mathbf{\Lambda}} = \mathbf{\Lambda} \circ \mathbf{\Omega}, \\ \mathbf{N_g} = \mathbf{\Lambda} \circ \mathbf{N} \circ \overline{\mathbf{\Lambda}}, \\ a_h = n_h - g, \\ T\dot{v}_h + v_h = a_h, \\ T\dot{h} + h = v_h. \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{\Lambda}$ – кватернион ориентации, $\overline{\mathbf{\Lambda}}$ – сопряженный кватернион, $\mathbf{\Omega}$ – кватернион, компонентами которого является показания гироскопов, «$\circ$» – символ произведения кватернионов, $\mathbf{N_g} = (n_N, n_h, n_E)^T$ – гиперкомплексное отображение вектора кажущегося ускорения в географической системе координат, n_N – северная составляющая вектора кажущегося ускорения в географической системе координат, n_h – вертикальная составляющая вектора кажущегося ускорения в географической системе координат, n_E – восточная составляющая вектора кажущегося ускорения в географической системе координат, $\mathbf{N}$ – гиперкомплексное отображение вектора кажущегося ускорения в связанной системе координат, a_h – абсолютное вертикальное ускорение, g – ускорение свободного падения, v_h – составляющая вертикальной скорости h – измеренное вертикальное перемещение, T – постоянная времени.

Первое уравнение системы (1) позволяет определить кватернион ориентации ВБ на основе сигналов гироскопов, с помощью которого осуществляется пересчет показаний акселерометров в географическую систему координат (второе соотношение системы (1)). Третье равенство (1) характеризует компенсацию ускорения силы тяжести в проекции кажущегося ускорения n_h. Последние два равенства (1) реализуют процесс интегрирования с помощью апериодических звеньев первого порядка с постоянной времени *T*.

Имитационная модель, реализующая систему уравнений (1), приведена на рис.2.

Параметры волны, подаваемые на вход системы, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры волны

Параметр	Величина
Амплитуда волны	10 м
Частота волны	0,1·2·π рад/с

Два интегратора введены в систему для сравнения работы предлагаемого алгоритма с традиционным вертикальным каналом БИНС.

Результаты моделирования приведены на рис. 3.

На рис. 4 приведены результаты моделирования алгоритма ВБ с учетом смещения нулевого сигнала акселерометра значением 10^{-4} м/с^2. К аналогичным погрешностям измерения высоты волны может привести недокомпенсация ускорения силы тяжести, уравновешивание которой является сложной задачей. Связано это с тем, что гравитационные условия варьируются под воздействием множества факторов, включая высоту над уровнем моря и географическое положение.

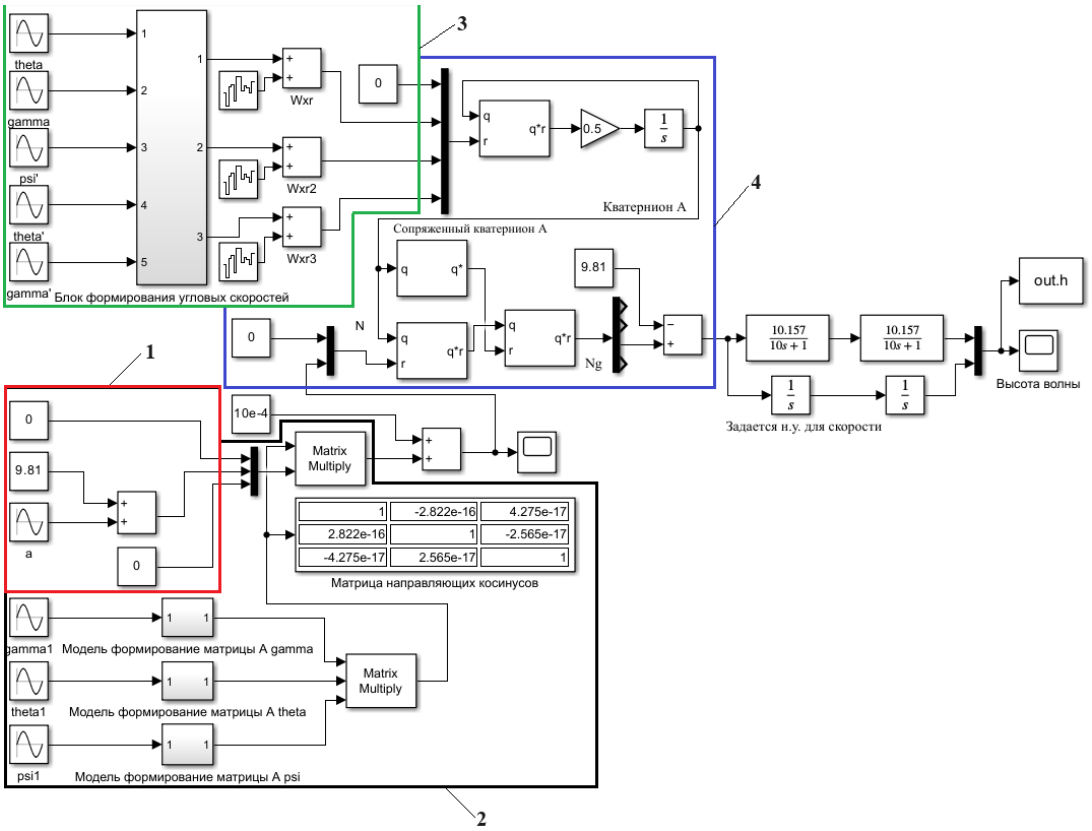


Рис. 2. Имитационная модель ВБ по определению высоты волны: 1 – формирование измерений акселерометра (истинное ускорение ВБ), 2 – формирование истинной матрицы, 3 – формирование измерений гироскопа, 4 – блок пересчета

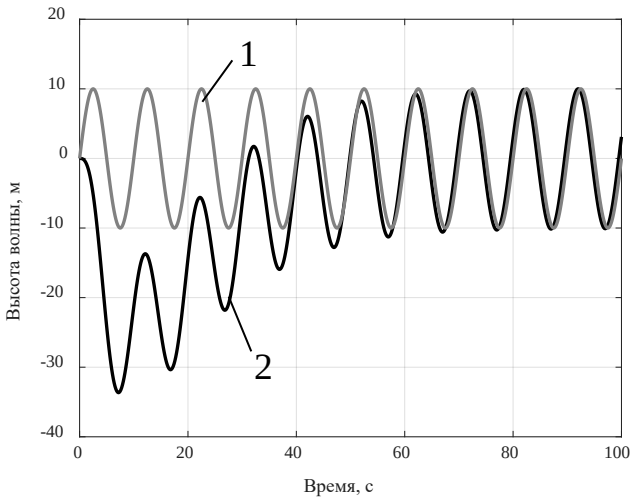


Рис. 3. Результат моделирования алгоритма работы ИИМ ВБ: 1 – с идеальными интеграторами; 2 – с апериодическими звеньями

Из результатов моделирования следует, что использование традиционного вертикального канала БИНС приводит к неограниченному росту погрешностей измерения высоты волны. За интервал моделирования 500 с погрешность составила 130 м. При реализации алгоритма работы ВБ с апериодическими звеньями, данные инструментальные погрешности не вызывают неограниченного роста ошибки определения амплитуды волны, что подтверждает эффективность данного метода.

Макетный образец волномерного буя. В лабораторных условиях был разработан макетный образец волномерного буя, представленный на рис. 5. Он состоит из инерциального измерительного модуля (ИИМ) и блока питания.

БИНС реализуется на базе ИИМ, который состоит из триады микромеханических датчиков угловой скорости (гироскопов) и триады акселерометров, оси чувствительности которых совпадают и ортогональны между собой, а также контроллера, который считывает измеренные данные и осуществляет их предварительную обработку.

В качестве датчиков угловой скорости и ускорения используется устройство GY-521. Характеристики некоторых инструментальных погрешностей инерциальных датчиков приведены в табл. 2.

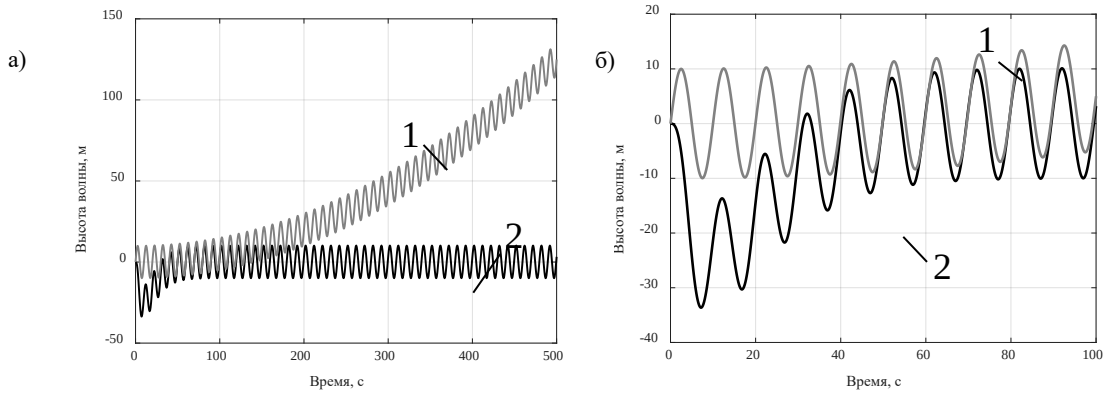


Рис. 4. Результат моделирования алгоритма работы ИИС волномерного буя с учетом инструментальных погрешностей: а – за 1000сек, б – в масштабе: 1 – интегрирующие звенья, 2 – апериодические звенья

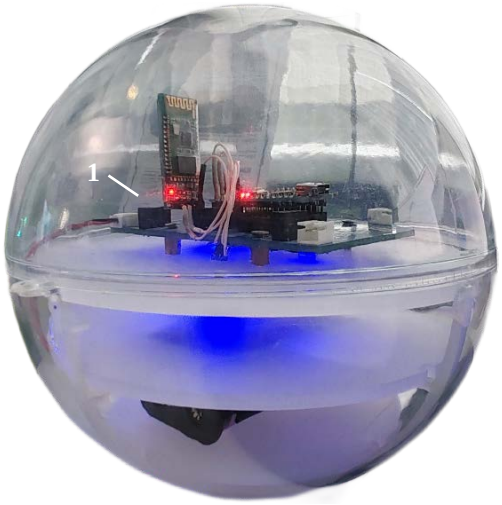


Рис. 5. Макетный образец ВБ: 1 – инерциальный измерительный модуль, 2 – блок питания

Таблица 2

Характеристики инструментальных погрешностей

Характеристика	Величина
Погрешность нулевого сигнала от g	360 °/ч/g
Случайный угловой уход	0,3 °/$\sqrt{ч}$
Погрешность масштабного коэффициента	±3 %

Для осуществления передачи данных на береговой пункт обработки данных, был выбран 8-битный микроконтроллер семейства *AVR –ATmega*328*P*. Некоторые технические характеристики приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики ATmega*328*P

Характеристика	Величина
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение	7-12 В
Постоянный ток через вход/выход	40 мА
Тактовая частота	16 МГц

Инерциальный измерительный модуль позволяет повысить надежность волномерного буя, повысить его автономность, расширить диапазон измеряемых длин волн, уменьшить массогабаритные характеристики, повысить его вибро- и ударостойкость [5].

Заключение. Применение традиционного вертикального канала БИНС с использованием двух интегрирующих звеньев приводит к неограниченному росту погрешностей измерения высоты волны.

Реализация алгоритма волномерного буя с апериодическими звеньями продемонстрировала, что инструментальные погрешности не вызывают бесконечного роста ошибки в определении высоты волны, что свидетельствует о высокой эффективности данного метода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта ректора ТулГУ для обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам магистратуры, № ПУ/23/02/ГРР_М.

Список литературы

1. Васильев К.П. Что должен знать судоводитель о картах погоды и состояния моря. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1980. 231 с.

2. Коровин В.П. Океанологические наблюдения в прибрежной зоне моря. Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2007. 434 с.
3. Грязин Д.Г. Теория, расчет и проектирование буев для измерения морского волнения / Д.Г. Грязин, К.А. Глеб, О.О. Белова. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2022. 240 с.
4. Коровин В. П. Морская гидрометрия: учебник / В. П. Коровин, Е. И. Чверткин. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1988. 262 с.
5. Патент № 2631965 C1 Российская Федерация, МПК B63B 22/00, G01C 13/00, G01W 1/04. Волномерный буй с инерциальным измерительным модулем на основе микромеханических датчиков : № 2016137459 : заявл. 19.09.2016 : опубл. 29.09.2017 / Д. Г. Грязин, О. О. Белова, Л. П. Старосельцев; заявитель Акционерное общество "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор".

Колесникова Александра Геннадьевна, магистрант, gentle_visual@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Матвеев Валерий Владимирович, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, matweew.valery@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF A WAVE-MEASURING BUOY FOR SEA WAVE CHARACTERIZATION

A.G. Kolesnikova, V.V. Matveev

This paper considers the main parameters of sea waves and presents various means for their measurement depending on the research objectives. A mathematical description and block diagram of the algorithm of the information-measuring system (IMS) of a wave buoy (WB) for determining the sea wave parameters are proposed. The results of comparison of algorithms with aperiodic links and the traditional method with integrating links for determining the sea wave height are given. A mockup sample of the WB with its technical characteristics, developed in laboratory conditions, is presented.
Key words: wave buoy, information-measuring system, algorithm, wave height, inertial measurement module.

Kolesnikova Alexandra Gennadievna, master's, gentle_visual@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Matveev Valery Vladimirovich, doctor of technical sciences, head of the department, matweew.valery@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.8
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-299-300

МУЛЬТИСВЕРТОЧНАЯ НЕЙРОСЕТЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ АКСЕЛЕРОМЕТРА И АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ АКТИВНОСТИ

И.А. Матыцина, В.В. Баркалов, В.С. Науменко

Система анализа эффективности работы сотрудников, использующая нейросетевые технологии, направлена на увеличение производительности и сокращение затрат в пищевой промышленности, особенно на предприятиях по переработке растительного масла. Эта разработка основана на применении нейросетей для выявления ключевых факторов производительности, обнаружения скрытых резервов и предотвращения ошибок. Приложение на платформе Wear OS собирает данные с акселерометра, фиксируя движения работников, что позволяет анализировать их активность. Архитектура многоканальной нейросети (MCNN) обеспечивает высокую точность распознавания паттернов в временных рядах, что делает систему эффективной для мониторинга и оптимизации производственных процессов.
Ключевые слова: анализ эффективности, нейросети, пищевой промышленность, MCNN, мониторинг персонала, производственные процессы, оптимизация затрат.

Классификация временных рядов становится всё более востребованной задачей — в последние годы объёмы данных буквально взлетают. В 2023 году, например, общий объём информации в мире перевалил за впечатляющие 120 зеттабайт, и эксперты предсказывают дальнейший рост на 30% ежегодно. Примечательно, что значительная часть этих данных представлена именно временными рядами: показания различных датчиков, финансовые котировки, медицинские измерения — всё это приходит к нам в виде последовательностей, меняющихся во времени.

Работать с такими данными не так просто. Из-за шума данные бывают скрытыми и сложно уловимыми. Кроме того, временные ряды часто содержат как долгосрочные, так и мгновенные колебания, что усложняет их анализ и классификацию.

Временные ряды – это последовательность данных, упорядоченные во времени. Они отражают изменения самых разных показателей: температуры, частоты сердечных сокращений, уровня сахара в крови, курса валют и многого другого. Интересно, что с их помощью можно не только проследить развитие того или иного явления, но и обнаружить скрытые тенденции, сезонные колебания или даже аномалии. Наблюдая за изменениями, можно понять поведение системы, что открывает перед исследователями возможность для прогнозирования и принятия более обоснованных решений.

Классификация временных рядов — задача, где на кону точность и быстрота реакции. В медицине анализ временных рядов может отличить здоровый ритм сердца от патологии. В финансовых системах — предсказать изменения на рынке. В промышленности — обнаружить отклонения в работе оборудования. Примечательно, что гра-

мотная классификация позволяет выявить особенности поведения каждого временного ряда, а значит, помогает строить системы, способные моментально реагировать на изменения.

Однако методы анализа таких данных сталкиваются с проблемами. Временные ряды, как правило, отличаются по масштабу и часто содержат шум, который затрудняет выделение важных признаков. В некоторых случаях значимые особенности могут проявляться и в долгосрочных трендах, и в быстрых скачках, что усложняет задачу для традиционных моделей. Такие модели порой ограничены одним временным масштабом или требуют ручного подбора характеристик, что делает их менее универсальными.

Традиционные методы классификации временных рядов. Классификация временных рядов задача непростая. У каждого метода свои плюсы и минусы, и выбрать нужный — значит понять, как он соотносится с задачей. Один из популярных подходов основывается на измерении расстояний между рядами. Основная идея в том, чтобы выяснить, насколько они похожи. Алгоритм динамического искривления времени, или DTW, буквально искревляет временные ряды, выравнивая их ключевые точки.

Благодаря этому удается уловить общие черты, даже если данные немного смещены по времени или растянуты. Интересно, что DTW часто используется в паре с методом k-ближайших соседей (k-NN), что помогает находить сходство среди известных структур и, таким образом, классифицировать ряды.

Однако у этого подхода есть и свои ограничения. В первую очередь, такие методы довольно сильно зависят от выбранных метрик сходства, и если алгоритм не способен "увидеть" сложные закономерности, то точность классификации может пострадать. Кроме того, для крупных наборов данных они могут оказаться слишком медленными, ведь каждый ряд нужно будет сравнить с каждым. В случае, когда нужна высокая скорость или глубокий анализ необычных временных паттернов, подобные методы могут подвести.

Другой подход — методы, основанные на признаках. Здесь временной ряд сначала "упаковывается" в набор характеристик, которые лучше всего отражают его особенности. Это могут быть простые статистические показатели, как среднее значение или разброс, а также более сложные спектральные характеристики, помогающие понять частотные свойства данных. Получив такой набор признаков, временной ряд можно представить как вектор, с которым уже можно работать с помощью классических методов классификации — например, с помощью метода опорных векторов (SVM) или деревьев решений.

Интересно, что такой подход часто применяется в медицине для прогнозирования состояния пациентов. К примеру, временной ряд данных о сердечном ритме можно разбить на короткие временные окна и для каждого из них вычислить ключевые статистики: среднее, максимум, минимум и другие. Эти признаки затем объединяются в единый вектор, который позволяет выявить различия между нормальными показателями и состояниями, требующими вмешательства.

Конечно, методы на основе признаков имеют свои недостатки. Один из них — необходимость заранее выбрать, какие именно характеристики извлекать, что не всегда просто. Ошибка в выборе признаков может привести к тому, что модель просто "не заметит" важных деталей. Кроме того, такой подход может не учитывать динамику временного ряда, что ограничивает его гибкость и применимость в более сложных задачах, где важна не только структура данных, но и их изменения во времени.

Основная идея MCNN. Современные задачи классификации временных рядов всё чаще решаются с использованием сверточных нейронных сетей, в частности, мульти-масштабных сверточных сетей (MCNN). В отличие от традиционных подходов, где выделение признаков и их анализ идут как бы отдельно, MCNN объединяет эти процессы, позволяя сети автоматически находить значимые черты временного ряда и сразу применять их для классификации. Это значительно упрощает процесс анализа: нет нужды вручную подбирать и тестировать признаки — MCNN делает это за нас, и в итоге точность классификации возрастает.

В его основе — параллельные слои, каждый из которых нацелен на свои временные и частотные масштабы, словно разложенные линзы в объективе. Эти слои специально подбираются, чтобы фиксировать как общие долговременные тенденции, так и кратковременные всплески, которые могли бы ускользнуть при стандартном подходе. Такой подход позволяет MCNN одновременно и анализировать общий фон, и замечать редкие отклонения — сигналы, которые обычно не так-то просто уловить.

Преимущество этого метода особенно заметно в тех случаях, где стандартные методы могут оказаться излишне ограниченными. MCNN автоматически подстраивается под временную структуру данных, снимая с нас необходимость в длительной настройке и кропотливом выборе признаков. Более того, модель отлично работает на GPU, так что её можно применять на больших массивах данных, не теряя в скорости. Это открывает путь к её использованию в таких областях, где важны и скорость, и точность: медицинская диагностика, финансовая аналитика, контроль производственных процессов. В итоге MCNN не только ускоряет классификацию, но и делает анализ более надёжным, минимизируя вероятность упустить важные особенности.

Можно сказать, что MCNN позволяет «смотреть» на данные под разными углами, выявляя закономерности и аномалии, которые могли бы остаться незамеченными. Примечательно, что при изменении скорости или длительности колебаний модель всё равно сохраняет точность анализа. Это делает её действительно универсальным и мощным инструментом, идеально подходящим для решений, где ошибки обходятся дорого.

Архитектура MCNN (Multi-Channel Neural Network) – это структура, состоящая из трёх последовательных этапов, каждый из которых нацелен на поэтапное «вглядывание» во временной ряд, чтобы выделить значимые особенности. Эта поэтапная стратегия позволяет сети более эффективно анализировать и классифицировать те признаки, которые традиционным методам обычно ускользают.

Первый этап – преобразование данных. На начальной стадии применяется серия преобразований, призванная представить данные с разной степенью детализации. Интересно, что тут могут использоваться как простые техники (например, исходное представление ряда), так и более «глубокие» методы, такие как преобразование Фурье или вейвлет-преобразование. Каждый метод обработки по-своему раскрывает временные и частотные характеристики данных, обеспечивая разнообразие информации для анализа. Это закладывает основу для точного выделения признаков на последующих этапах.

Второй этап – локальная свёртка. Следующим шагом каждая из преобразованных версий ряда передаётся в свою сверточную ветвь, где используются фильтры, способные выделять мелкие, но значимые детали: от пиковой активности до кратковременных колебаний. Такие паттерны могут быть особенно важны для классификации, по-

скольку их появление часто характеризует особенности данных. Важное преимущество MCNN на этом этапе – её способность фокусироваться на ключевых признаках в коротких временных интервалах, которые могли бы быть незаметны при традиционной обработке.

Третий этап – полная свёртка и обобщение. После того как каждая сверточная ветвь выделила свои особенности, нейросеть объединяет результаты для создания обобщённого представления временного ряда. Завершающий слой softmax превращает всю эту многоуровневую обработку в предсказание вероятностей, на основе которых и происходит окончательная классификация.

Преимущества такой архитектуры состоит в адаптации нейросети к различным типам данных, эффективно выделяя более сложные и многомасштабные паттерны по сравнению с традиционными методами. Это делает её особенно полезной для анализа сложных временных рядов, где важно учитывать и временные, и частотные особенности данных.

Сравнение MCNN с другими методами:

- Эксперименты: Авторы провели обширные тесты, чтобы сравнить MCNN с существующими методами классификации временных рядов. Для этого использовались эталонные наборы данных, в которых MCNN демонстрировала более высокую точность по сравнению с традиционными методами.

- Результаты: MCNN показала себя особенно хорошо на наборах данных, где важно учитывать многомасштабные признаки. Она превосходила другие методы по точности, и её использование позволяло получать более устойчивые результаты даже при наличии шума.

- Значимость результата: Эти эксперименты показали, что MCNN не только равнозначна лучшим существующим методам, но и превосходит их по многим критериям, особенно когда требуется работа с большими объёмами временных данных.

Многоканальная свёрточная нейронная сеть (MCNN) объединяет в себе сразу два критически важных этапа — извлечение признаков и их классификацию — в единую модель. Это объединение позволяет значительно повысить точность при анализе временных рядов. Важным преимуществом MCNN является её способность эффективно работать с данными разного масштаба. В мире временных рядов, где ключевые особенности могут прятаться на разных временных уровнях, эта модель оказывается практически незаменимой.

Говоря о сильных сторонах, нельзя не отметить её способность автоматически выделять сложные, многослойные признаки, которые иначе сложно выявить. Кроме того, модель показывает высокую гибкость, легко адаптируясь к изменению временных масштабов. Её структура как будто специально создана для обработки больших объёмов данных, что открывает широкие горизонты для применения в реальных задачах. Ещё один немаловажный аспект: обучить MCNN на крупномасштабных наборах данных не составляет труда, что только расширяет возможности её использования.

С учётом высокой точности и гибкости, MCNN вполне может найти себе место во множестве областей, будь то медицина, финансы или промышленность. Где требуется выявление скрытых закономерностей или работа с массивными, сложными данными — MCNN явно на высоте. Например, в медицине её можно было бы использовать для анализа временных данных о здоровье пациентов, помогая выявить тенденции или потенциальные риски. А в финансовом секторе она могла бы стать инструментом для предсказания рыночных трендов, что особенно актуально в условиях стремительных изменений на биржевых рынках.

Список литературы

1. Бишоп К.М. Распознавание образов и машинное обучение. М.: Вильямс, 2011. 1104 с.

2. Кузнецов М.Д. Классификация временных рядов методом динамического искривления времени // Компьютерные науки и информационные технологии. 2019. Т. 1, № 2. С. 58–67.

3. Лешина А.В. Современные методы обработки временных рядов и их применение в медицине / А. В. Лешина, Н. П. Лапшин // Журнал медицинских технологий. 2021. № 3. С. 103–115.

4. Wang Z., Yan W., Oates T. Time series classification from scratch with deep neural networks: A strong baseline // International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). 2017. P. 1570–1576.

5. Cui Z., Chen W., Chen Y. Multi-scale Convolutional Neural Networks for Time Series Classification // Journal of Machine Learning Research. 2016. Vol. 17, No. 4. P. 1–40.

6. Wu Y., Lin Y. Time series analysis and forecasting with deep learning methods: Survey // Neurocomputing. 2022. Vol. 446. P. 135–155.

7. Исследование нейронных сетей для классификации временных рядов [Электронный ресурс]. URL: https://example-neural-tsc-research.com (дата обращения: 11.11.2024).

Матыцина Ирина Александровна, канд. техн. наук, доцент, irina210390@mail.ru, Россия, Воронеж, Воронежский филиал Государственный университет морского и речного флота имени адмирла С.О. Макарова,

Баркалов Вадим Владиславович, обучающийся, vadimbarkalov367@gmail.com, Россия, Воронеж, Воронежский филиал Государственный университет морского и речного флота имени адмирла С.О. Макарова,

Науменко Владимир Сергеевич, обучающийся, nauvlas@mail.ru, Россия, Воронеж, Воронежский филиал Государственный университет морского и речного флота имени адмирла С.О. Макарова

MULTI-CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR DETERMINING ACCELEROMETER SIGNALS AND ANALYZING PRODUCTION ACTIVITY

I.A. Matytsina, V.V. Barkalov, V.S. Naumenko

An employee performance analysis system using neural network technologies is aimed at increasing productivity and reducing costs in the food industry, especially in vegetable oil processing enterprises. This development is based on the

use of neural networks to identify key performance factors, detect hidden reserves and prevent errors. The Wear OS platform application collects data from the accelerometer, recording the movements of workers, which allows you to analyze their activity. The multi-channel neural network (MCNN) architecture provides high accuracy of pattern recognition in time series, which makes the system effective for monitoring and optimizing production processes.

Key words efficiency analysis, neural networks, food industry, MCNN, personnel monitoring, production processes, cost optimization.

Matytsina Irina Aleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, irina210390@mail.ru, Russia, Voronezh, Voronezh branch of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,

Barkalov Vadim Vladislavovich, student, vadimbarkalov367@gmail.com, Russia, Voronezh, Voronezh branch of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,

Naumenko Vladimir Sergeevich, student, nauvlas@mail.ru, Russia, Voronezh, Voronezh branch of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

УДК 535.8
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-302-303

ЗАДАЧА СБЛИЖЕНИЯ ДВУХ РОБОТОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПО ЛАЗЕРНОМУ КАНАЛУ СВЯЗИ

П.В. Черкасова, В.В. Матвеев

В статье рассматриваются преимущества использования способа передачи информации сигналов управления по лазерному каналу связи в сравнении с радиоканалом и проводным способом передачи данных. Рассмотрен способ применения лазерного канала связи в робототехнике. Представлен метод сближения по лучу на примере задачи робототехники.

Ключевые слова: оптические системы, лазерный канал связи, передача информации, лазер, оптическая связь, управление подвижным объектом

Развитие связи и передачи различного рода информации во многом повлияло на историю всего человечества. На протяжении долгого времени происходила эволюция средств передачи информации, люди общались между собой посредством передачи на большие расстояния различных знаков – звуковых и световых сигналов.

Многовековая эволюция передачи данных содержит немало исторически важных событий, среди которых: изобретения телеграфа, радио, телевизионного передатчика и т.д.

Первые опыты по передаче электрических сигналов по проводам относятся к XIX веку. Проводная связь, несмотря на появление новых беспроводных технологий, сохраняет ряд важных преимуществ и сейчас, однако, помимо достоинств, у проводной связи есть некоторые недостатки: необходимость прокладки линий связи, что требует больших материальных затрат, линии связи уязвимы к повреждениям при стихийных бедствиях, ограниченная мобильность – привязка к месту расположения точки подключения.

Дальнейшее развитие науки и техники позволило использовать для передачи информации радиосвязь. Несмотря на простоту в использовании: они являются популярным выбором для из-за их простоты и удобного интерфейса, такой тип связи обладает следующим недостатком – нарушение ее работы специальными станциями помех.

Однако научно-технический прогресс предъявляет все новые и новые требования к системам передачи информации. В настоящее время бурно развиваются так называемые лазерные каналы связи. Основными достоинством лазерной передачи данных является высокая скорость передачи и возможность передачи больших объемов данных на большие дальности [1].

В определенных условиях работы, например, высокочастотные помехи или ограничения по радиочастотному спектру, лазерная связь может предоставить стабильное соединение между передающей и принимающей аппаратурами управления.

Некоторые исследования показывают, что лазерная связь может обеспечивать скорости передачи данных до 100 Гбит/с, что значительно превышает возможности традиционных радиочастотных систем [2].

Целью настоящей статьи является исследование сближения роботов с применением лазерного канала связи.

Применение лазерного канала связи в управлении подвижными объектами. Применение лазерных каналов связи в робототехнике для управления за роботами в луче лазера является одним из интересных и перспективных направлений. Лазерный луч может использоваться для определения точного положения и ориентации робота в пространстве, данные о местоположении могут передаваться по лазерному каналу для улучшения навигации робота в сложных средах. Задачи управления сближением материальных точек возникают в различных областях техники. Так, например, в робототехнике – при наведении схвата на подвижную деталь [3].

Рассмотрим один из методов управления роботами – сближение по лучу лазерного канала.

Сближение по лучу состоит в том, что робот-преследователь ($Р_П$) должен оставаться на прямой, соединяющий главный робот ($Р_Г$) и точку, из которой ведется управление.

Для решения задачи сближения роботов введем следующие предположения:

1. Главный робот движется по прямой и не совершает никаких маневров.
2. Скорости главного и робота-преследователя не изменяются во времени;
3. Точка управления лазерного канала неподвижна;

4. В задаче рассматривается только движение в плоскости, проходящей через вектор скорости главного робота и точку управления лазерного канала.

Геометрические соотношения для сближения по лучу представлены на рисунке 1.

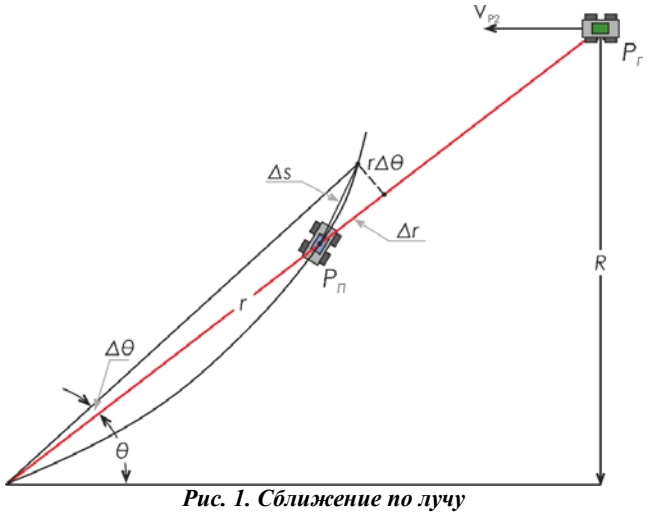


Рис. 1. Сближение по лучу

На рисунке 1 обозначено: s – длина дуги траектории; $V_{Рп}$ – скорость робота-преследователя; $V_{Рг}$ – скорость главного робота; R – постоянная дистанция до главного робота; r – наклонная дальность робота-преследователя от точки управления лазерного канала; θ – угол места относительно управляющей точки.

Непосредственно из рисунка 1 получаем выражение (1) [4]:

$$(\Delta s)^2 = (\Delta r)^2 + r^2(\Delta\theta)^2. \tag{1}$$

В пределе это дает выражение (2):

$$\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 + r^2 = \left(\frac{ds}{d\theta}\right)^2. \tag{2}$$

Расстояние, которое главный робот проходит за время t, будет вычисляться по выражению (3):

$$V_{P_Г} t = R\operatorname{ctg}\theta_0 - R\operatorname{ctg}\theta, \tag{3}$$

где θ_0 – угол, под которым стартует робот-преследователь (точка старта и точка управления совпадают).

Дифференцируя по θ, получаем выражение (4):

$$V_{P_Г}\frac{dt}{d\theta} = \frac{R}{\sin^2\theta}. \tag{4}$$

С учетом, что $V_{P_П} = \frac{ds}{dt}$, получаем выражение (5):

$$\frac{ds}{d\theta} = \frac{dsdt}{dtd\theta} = V_{P_П}\frac{R}{V_{P_Г}\sin^2\theta}. \tag{5}$$

Подставляя формулу (5) в формулу (2), находим выражение (6):

$$\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 + r^2 = \left(\frac{V_{P_П}}{V_{P_Г}}\right)^2 \frac{R}{\sin^4\theta}. \tag{6}$$

Вводя обозначения: $p = \frac{V_{P_П}}{V_{P_Г}}$ и $k = pR$, получаем дифференциальное уравнение (7) траектории движения робота-преследователя:

$$\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 + r^2 = \frac{k^2}{\sin^4\theta}. \tag{7}$$

Решение задачи сближения – построение траекторий роботов проводилось в среде *Mathcad*. Задавались следующие параметры: угол, под которым стартует робот-преследователь $\theta_0 = 18^\circ$, угол места относительно управляющей точки $\theta = 45^\circ$, постоянная дистанция до главного робота $R = 1000$ м.

Рассмотрим различные траектории движения робота-преследователя при различных соотношениях их скоростей p (рис.2).

Из рисунка 2 видно, что, если робот-преследователь следует за главным роботом и обоим удается поддерживать правильный угол и расстояние относительно друг друга, они могут точно встретиться в заданной точке, как видно для роботов с соотношением скоростей равным $p = 0{,}75$. Некорректные расчеты в алгоритмах, ответственных за управление сближением, могут стать причиной того, что роботы не достигают своей цели сближения (случай $p = 0{,}5$).

Исходя из рисунка 2 для случая $\theta_0 = 18^\circ$ и $p = 1$, приведем таблицу, в которой отражено зависимость координат и текущего угла места.

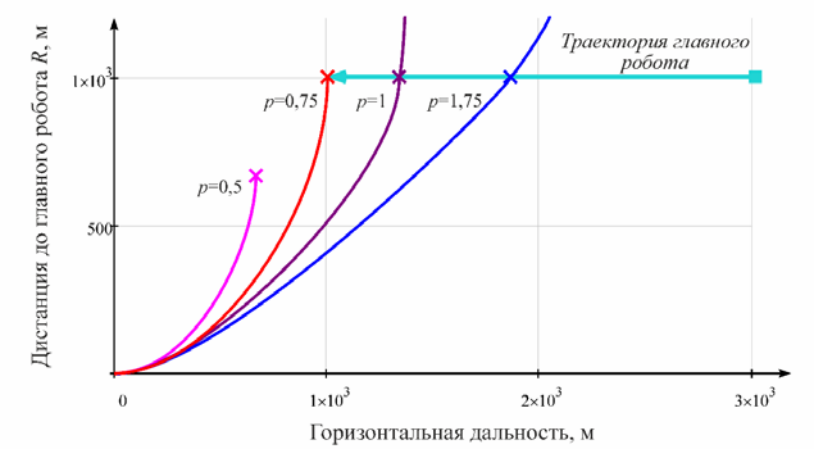


Рис. 2. Траектории при сближении по лучу, где $\theta_0 = 18^o$

Зависимость угла места θ ***и координат x и y***

θ,°	*x, м*	*y, м*
25	842,87	393,04
30	1151,6	664,85
35	1314,2	920,2
37	1347,6	1015,5
40	1369,1	1148,8

Эта таблица помогает структурировать процесс сближения, где стыковка роботов происходит, когда угол достигает примерно 37°.

Заключение. Использование лазерного канала связи для управления подвижными объектами открывает новые горизонты в области навигации и взаимодействия роботов, значительно повышая их эффективность при выполнении сложных задач. Метод сближения по лучу, описанный в статье, демонстрирует один из практических аспектов применения лазерной связи, предоставляя возможность улучшения точности и надежности операций с роботами.В исследовании отражено, что при правильном подборе угла, под которым стартует робот-преследователь $\theta_0 = 18^\circ$ и угла места относительно управляющей точки $\theta = 45^\circ$, приведенные выражения позволяют добиться точного сближения двух роботов, несмотря на то, что скорость робота-преследователя меньше скорости главного робота.

Учитывая постоянный рост потребностей в высокоскоростных и устойчивых системах передачи данных, лазерные каналы связи, безусловно, будут играть важную роль в будущем развитии технологий управления и автоматизации. В дальнейшем исследование и развитие лазерных систем могут привести к еще более успешным решениям в областях автоматизированного управления и робототехники.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта ректора ТулГУ для обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам магистратуры, № НИЧ-8955/ПУ/23/01/ГРР_М.

Список литературы

1. Лиманенко В.Д., Симиненко П.Д., Чапенко В.А., Пузановский К.В. Передача данных в атмосферной среде посредствам лазерного излучения // Нанотехнологии: наука и производство. 2023. № 3. С. 34-37.

2. Богачева А.А. Лазеры в системах управления беспилотными летательными аппаратами / А. А. Богачева, В. А. Богачев // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 97-11. С. 27-29.

3. Крамаренко Н. В. Алгоритмы управления движениями точки и робота-манипулятора / Н. В. Крамаренко, А. А. Рыков. // Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. 87 с.

4. Артур С. Локк Управление снарядами. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1957. 776 с.

Матвеев Валерий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, matweew.valery@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Черкасова Полина Владимировна, студент, cherkasova.p@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

LASER COMMUNICATION CHANNEL CONTROL OF MOVING OBJECTS

P.V. Cherkasova, V.V. Matveev

The article considers the advantages of using the method of information transmission of control signals by laser communication channel, in comparison with radio channel and wired data transmission method. The method of application of laser communication channel in robotics is considered. The method of ray convergence on the example of robotics task is presented.

Key words: optical systems, laser communication channel, information transmission, laser, optical communication, control of a mobile object.

Matveev Valery Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, matweew.valery@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Cherkasova Polina Vladimirovna, student, cherkasova.p@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 681.787
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-305-306

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ СИГНАЛА В НИЗКОКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ ПРИ ДЛИНЕ ВРЕМЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОРЯДКА 6,8 МКМ

Е.Е. Майоров, В.В. Курлов, А.В. Арефьев, В.П. Пушкина

Настоящая работа посвящена исследованию амплитуды сигнала в низкокогерентном свете при длине временной когерентности излучения порядка 6,8 мкм. Автоматизированные интерференционные приборы, работающие в низкокогерентном свете, достигли больших успехов в практическом применении за счет компактности, простоты эксплуатации и динамики измерений. Появилась информация анализа метрологии негладких поверхностей в разных режимах измерений (триггерный, сканирующий). Решены вопросы построения и эксплуатационных характеристик этих приборов. Разработчики постоянно совершенствуют функциональные возможности и повышают информационное содержание измерений этих приборов, поэтому работа актуальна и перспективна. В статье поставлены цель, задачи, определены метод и объект исследования. Приведена схема реализации экспериментальной измерительной установки. Получены значения изменения амплитуды сигнала при перемещении зондирующего пятна по поверхности объекта, а также зависимость усредненной амплитуды выходного сигнала от размера зондирующего пятна.

Ключевые слова: экспериментальная интерференционная установка, амплитуда сигнала, длина волны излучения, длина когерентности, источник излучения, светоделительная пластина, опорное зеркало.

Цифровые автоматизированные интерференционные приборы и комплексы, работающие в низкокогерентном свете для изучения поверхности сложной формы перспективны и актуальны [1]. Их преимущества над оптическими приборами и комплексами геометрической оптики очевидны. Во-первых, чувствительность и диапазон измерений этих технических средств превосходит на порядок при динамическом контроле поверхности. Во-вторых, контроль точек поверхности можно вести на выбранном расстояние до измеряемой поверхности, не учитывая значения апертурных углов [2].

Интерферометры, построенные по классическим схемам не пригодны для измерения не гладких поверхностей, так как используют высококогерентные источники света (лазеры), где длина когерентности источников варьируется от 10 мм до 50 мм [3]. А это означает, что при анализе светового излучения отражённого от исследуемой поверхности сложной формы данные о рельефе возможно получить только в пределах длины когерентности, поэтому кроме шума никакой информации извлечь не получиться [4-8].

В современных автоматизированных интерференционных приборах, работающих в низкокогерентном свете (АИПНК), используют источники белого света, суперлюминесцентные диоды, у которых длина когерентности находится в диапазоне от 100 мкм до 1 мкм [9-15]. Длина когерентности источника излучения является ключевым параметром этих приборов, так как чем меньше длина когерентности, там выше точность измерения микрорельефа поверхности [16-20].

АИПНК достигли больших успехов в практическом применении за счет компактности, простоты эксплуатации и динамики измерений [17-21]. Появилась информация анализа метрологии негладких поверхностей в разных режимах измерений (триггерный, сканирующий). Решены вопросы построения и эксплуатационных характеристик АИПНК. Разработчики постоянно совершенствуют функциональные возможности и повышают информационное содержание измерений этих приборов [18-21].

Поэтому представляет интерес исследование амплитуды выходного сигнала экспериментальной интерференционной установки с суперлюминисцентным светодиодом на основе InGaN с длиной волны $\lambda = 387$ нм, длиной когерентности $l_c = 6{,}8$ мкм, мощностью излучения 1 мВт для контроля микрорельефа поверхности.

Целью работы явилось получение информации о зависимости амплитуды выходного сигнала от расфокусировки зондирующего пятна экспериментальной измерительной установки.

Постановка задачи. Исследовать амплитуду оптического сигнала разработанной интерференционной установки, работающей в низкокогерентном свете при изменении на поверхности диаметра зондирующего пятна. Представить графически экспериментальные результаты изменения амплитуды сигнала при перемещении зондирующего пятна по поверхности объекта по оси *x*.

Метод и объекты исследования. Исследовалась обработанная поверхность плоской медной пластины чистота поверхности которой относилась к четвертому классу шероховатости ($R_a = 6{,}3$ мкм).

Для проведения исследований использовалась разработанная экспериментальная измерительная установка, реализованная на базе интерферометра Майкельсона, схема которой приведена на рисунке 1.

Источник излучения – суперлюминесцентный светодиод на основе InGaN с длиной волны λ = 387 нм, длиной когерентности l_c = 6,8 мкм, мощностью излучения 1 мВт. В измерительный (объектный) канал вводился измеряемый образец. Когда длина плеча в опорной ветви QM совпадет с длиной плеча в объектной ветви QN, тогда возможно наблюдать видность интерференционной картины. При условии $2\Delta z > l_c$ видность интерференционной картины пропадёт и только при смещении опорного зеркала R на величину $\Delta z' = \Delta z$ можно восстановить видность. Исследуя интерференционную картину при перемещении поверхность вдоль оси z, появляется возможность выравнивать смещение поверхности перемещением опорного зеркала. Для того чтобы получить данные о смещении поверхности Δz достаточно вести контроль смещений опорного зеркала $\Delta z'$.

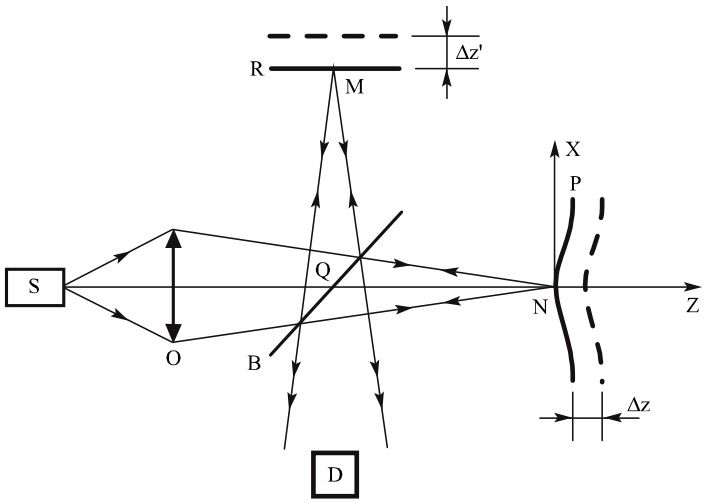


Рис. 1. Схема реализации экспериментальной измерительной установки: S - источник излучения; D – фотоприёмная часть; B – светоделительная пластина; P – поверхность объекта; R – опорное зеркало

В данной реализации контрастная интерференционная картина будет существовать лишь при равенстве длин плеч интерферометра в пределах длины когерентности.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Исследовалась амплитуда сигнала, причем, максимум амплитуды соответствовал начальному положению опорного зеркала. Расстояние от выходного зрачка установки до исследуемой поверхности равнялось 70 мм. Регистрация амплитуды сигнала осуществлялась при перемещении поверхности по оси *x*, где частота сканирования опорного зеркала *f* = 46 Гц.

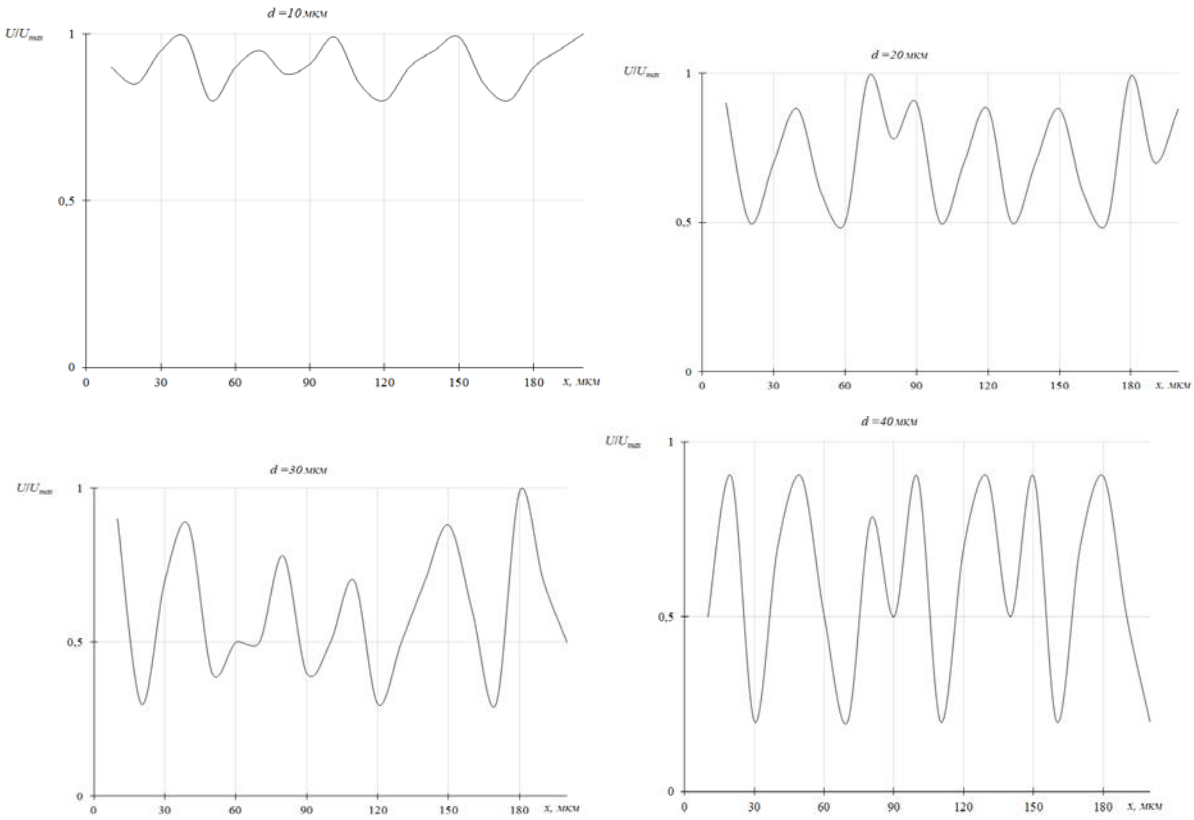


Рис. 2. Изменение амплитуды сигнала при перемещении зондирующего пятна по поверхности объекта

Плоская медная пластина устанавливалась на подвижной платформе микрометрического столика (ОСК-2). На пластину крепили одну за другой плоскопараллельные стеклянные пластины разной толщины, чтобы изменить диаметр светового пятна (*d*) на изучаемой поверхности. В эксперименте толщины стеклянных пластин были 700 мкм, 1200 мкм, и 1700 мкм, что соответствовало диаметру пятна на поверхности 20 мкм, 30 мкм и 40 мкм.

Из рисунка 2 видно, каким образом происходит модуляция относительной амплитуды при перемещении поверхности по оси *x* при фиксированной частоте зеркала $f = 46$ Гц и разных диаметрах пятна.

На рисунке 3 показана зависимость среднего значения амплитуды сигнала от размера светового пятна на поверхности.

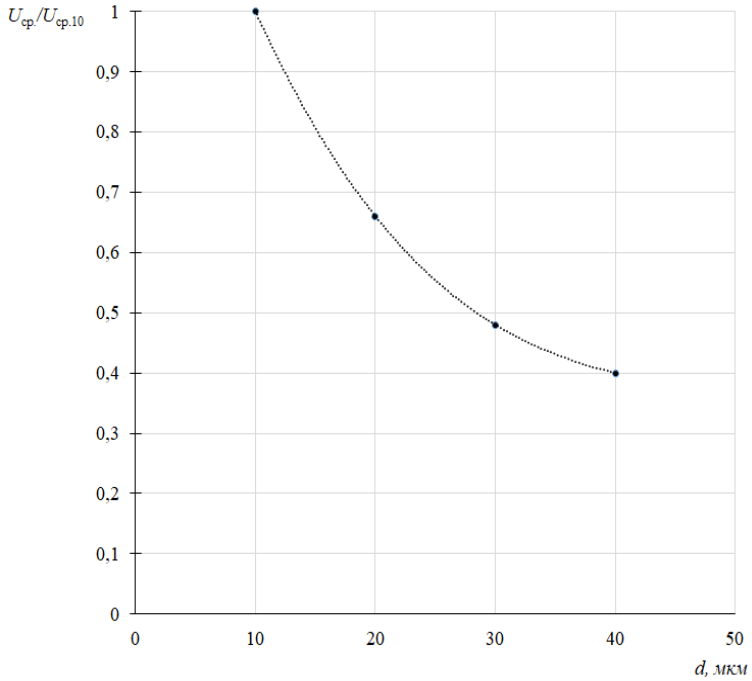


Рис. 3 Зависимость усредненной амплитуды выходного сигнала от размера зондирующего пятна. $U_{ср.10}$ – амплитуда сигнала при d = 10 мкм

Усредненную амплитуду выходного сигнала исходя из экспериментальных данных можно представить полиномом третьей степени:

$$U_{ср}/U_{ср.10} = -0{,}00001\,d^3 + 0{,}0014\,d^2 - 0{,}069\,d + 1{,}56,$$

где величина достоверности аппроксимации $R = 1$.

При измерениях наблюдалось изменение амплитуды сигнала в пределах размеров освещенного участка поверхности. Видимо это было связано с сильно деформированными участками контролируемой поверхности (перепады высот в пределах микрометра).

Заключение. Для экспериментальной интерференционной установки, работающей в низкокогерентном свете экспериментально исследована амплитуда выходного сигнала при сканировании испытуемой поверхности для различных диаметров светового пятна на поверхности объекта. Как следует из графических зависимостей, при увеличении диаметра светового пятна уменьшается амплитуда интерференционного сигнала и в следствии чего увеличивается погрешность измерений.

Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. 1970. 855 с.
2. Kyeong-Hee Lee, N.B.Voznesensky, V.K.Kirillovsky. Principle of certification of high precision optical parts and systems based on diffraction interferometer. Proceedings of The First Scientific Workshop-Presentation «Optical Micro- and Nanotechnologies (OmaN-1)». 2002. С. 32-40.
3. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.В. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. Л: Лениздат, 1887. 294 с.
4. Малакара Д. Оптический производственный контроль: пер. с англ. под ред. Соснова А.Н. М.: Машиностроение. 1985. 340 с.
5. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра. 1968. 263 с.
6. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М., 1981. 640 с.
7. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение. 1987. 264 с.
8. Духопел И.И., Федина Л.Г. Интерференционные методы и приборы для контроля правильности формы сферических поверхностей // ОМП. 1973. №8, С. 50 – 55.
9. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А. Расчет параметров сканирования интерферометрической системы контроля формы диффузно отражающих объектов // Приборы. №7 (145). 2012. С.23–25.

10. Майоров Е.Е. Машек А.Ч., Прокопенко В.Т. Хайдаров Г.Г. Применение поперечно-сдвиговой интерферометрии в голографической интерферометрии для контроля диффузно отражающих объектов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 4: Физика, химия. 2012. Вып. 4. С. 31–35.

11. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение. 2013. том 23. №2. С.38-46.

12. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А. Разработка компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Приборы. №11 (185). 2015. С.26-31.

13. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А. Алгоритмы обработки информационного сигнала компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Научное приборостроение. 2015. том 25. №4. С.61-66.

14. Хохлова М.В., Арефьев А.В., Майоров Е.Е., Гулиев Р.Б., Дагаев А.В., Громов О.В. Экспериментальное исследование метрологических характеристик разработанного оптического щупа триггерного типа // Приборы. 2021. № 5. С. 8-16.

15. Майоров Е.Е., Сорокин А.А., Пушкина В.П., Удахина С.В., Коцкович В.Б., Арефьев А.В. Автоматизированный оптический зонд для томографических исследований // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып.6. С. 113-119. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-113-119.

16. Бородянский Ю.М., Майоров Е.Е., Петрова Е.А., Попова Е.В., Курлов В.В., Удахина С.В. Измерение геометрических параметров поверхностей сложной формы низкокогерентной оптической системой // Приборы. 2022. № 5 (263). С.3-7.

17. Майоров Е.Е. Федоренко А.Г., Чабаненко А.В., Хохлова М.В., Гулиев Р.Б., Дагаев А.В. Исследование геометрии освещения в двухлучевых интерферометрах // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып.8. С. 75-80. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-75-80.

18. Майоров Е. Е., Костин Г. А., Курлов В. В., Баранов Н. Е. Исследование динамической поверхности летательного аппарата интерференционным методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 8. С. 722–726. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726.

19. Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Пушкина В. П., Дагаев А. В. Исследование низкокогерентного интерферометрического зонда, при работе в сканирующем режиме измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 790–797. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-790-797.

20. Майоров Е.Е., Курлов В.В., Арефьев А.В., Пушкина В.П. Оптимизация фотоприёмной части интерференционной установки способом параллельной обработки оптических сигналов // ПРИБОРЫ. 2024. № 9. С. 32-35.

21. Майоров Е. Е., Жулега И. А., Новиков А. В. Инновационное решение в исследовании поверхности сложной геометрической формы сканирующим интерференционным щупом // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 5. С. 45–50. DOI: 10.31799/2949-0693-2024-5-45-50.

Майоров Евгений Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, majorov_ee@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Курлов Виктор Валентинович, канд. техн. наук, доцент, vitek543@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Арефьев Александр Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доцент, aaref@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Пушкина Вера Павловна, канд. экон. наук, доцент, vera150465@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

INVESTIGATION OF THE SIGNAL AMPLITUDE IN LOW-COHERENT LIGHT WITH A TIME COHERENCE LENGTH OF ABOUT 6.8 MICRONS

E.E. Maiorov, V.V. Kurlov, A.V. Arefiev, V.P. Pushkina

This work is devoted to the study of the amplitude of the signal in low-intensity light at a time coherence length of about 6.8 microns. Automated interference devices operating in a low-coherence mode have achieved great success in practical application due to their compactness, ease of operation and measurement dynamics. Information has appeared on the analysis of the methodology of non-smooth surfaces in different measurement modes (trigger, scanning). The issues of construction and operational characteristics of these instruments have been resolved. Developers are constantly improving the functionality and improving the information content of measurements of these devices, so the work is relevant and promising. The article sets the goal, objectives, defines the method and object of the study. A scheme for the implementation of an experimental measuring installation is presented. The values of the change in the amplitude of the signal when the probing spot moves over the surface of the object, as well as the dependence of the average amplitude of the output signal on the size of the probing spot, are obtained.

Key words: experimental interference setup, signal amplitude, radiation wavelength, coherence length, radiation source, beam-splitting plate, reference mirror.

Maiorov Evgeny Evgenievich, candidate of technical sciences, docent, majorov_ee@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Kurlov Viktor Valentinovich, candidate of technical sciences, docent, vitek543@ramblerl.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Arefiev Alexander Vladimirovich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, aaref@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Pushkina Vera Pavlovna, candidate of economic sciences, docent, vera150465@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP)

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-309-310

КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА МКД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ ИИ

А.Ю. Кагазежев

В условиях сурового климата Арктической зоны проектирование многоквартирных домов (МКД) требует тщательного учета специфических факторов, таких как низкие температуры, ветровые и снеговые нагрузки, а также ограниченные временные рамки для выполнения работ. В данной статье предлагается концепция совершенствования проектирования МКД с применением систем искусственного интеллекта (ИИ), основанная на ранее разработанной типологии зданий. Все МКД разделены на типы по ключевым параметрам: тип кровли, фасада, количество этажей. Для каждого типа разработаны готовые проектные решения, которые значительно упрощают процесс проектирования и ремонта. Предлагается использовать методы компьютерного зрения (CV), машинного обучения (ML) и обработки естественного языка (NLP) для автоматической классификации зданий, выбора наиболее подходящих проектных решений из базы данных и их адаптации под индивидуальные особенности объекта. Автоматизация этих процессов позволит значительно сократить время проектирования, повысить точность расчетов и адаптировать готовые решения для сложных условий эксплуатации. Результаты исследования показывают, что интеграция ИИ в процесс проектирования позволяет оптимизировать работу инженеров, снижая затраты времени и ресурсов, а также повышая качество проектных решений, особенно в экстремальных климатических условиях Арктики.

Ключевые слова: многоквартирные жилые дома, капитальный ремонт, искусственный интеллект.

Проектирование многоквартирных домов (МКД) в Арктической зоне представляет собой сложную инженерную задачу, требующую учета экстремальных климатических условий, таких как низкие температуры, сильные ветровые нагрузки, значительные снеговые массы и наличие вечной мерзлоты. Эти факторы оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики зданий и увеличивают риск разрушений, если проектирование выполнено без учета региональных особенностей. [1]. В таких условиях использование традиционных методов проектирования зачастую требует значительных временных и материальных затрат, а также не всегда обеспечивает необходимую точность и надежность.

Современные технологии искусственного интеллекта (ИИ) предлагают новые возможности для повышения эффективности и качества проектирования. Методы компьютерного зрения (CV), машинного обучения (ML) и обработки естественного языка (NLP) позволяют автоматизировать ключевые этапы проектирования, включая анализ исходных данных, подбор оптимальных проектных решений и их адаптацию. Особенно актуальным становится применение ИИ в условиях жестко ограниченного времени на проведение строительных и ремонтных работ в Арктике. [2]

В данной работе особое внимание уделено интеграции ИИ с уже разработанной типизацией МКД, которая основана на делении зданий по ключевым признакам: тип кровли, фасада и количество этажей. Для каждого типа зданий создана база готовых проектных решений, позволяющая ускорить процесс проектирования и повысить его точность [3]. Использование ИИ для автоматического выбора и адаптации этих решений открывает новые перспективы в создании проектов, оптимально учитывающих как климатические, так и эксплуатационные требования.

Цель данной статьи – разработка концепции автоматизации проектирования МКД с использованием систем ИИ, направленной на:

автоматическое распознавание типов зданий;

выбор оптимальных проектных решений из базы данных;

адаптацию типовых решений под индивидуальные параметры объекта.

Введение ИИ в процесс проектирования позволит повысить эффективность работы инженерных команд, сократить время проектирования и снизить риск ошибок, обеспечивая при этом соответствие проектных решений сложным условиям Арктической зоны [4].

Материалы и методы. Проектирование многоквартирных домов (МКД) в условиях Арктической зоны требует применения современных технологий, способных учитывать как типовые характеристики зданий, так и индивидуальные особенности каждого объекта. В данной работе предлагается концепция, базирующаяся на интеграции систем искусственного интеллекта (ИИ) с уже разработанной типизацией МКД, которая включает следующие основные категории:

Тип кровли (плоская, скатная, комбинированная).

Тип фасада (кирпичный, панельный, навесной).

Количество этажей (низкоэтажные, среднеэтажные, многоэтажные).

Для каждой категории ранее были разработаны готовые проектные решения, охватывающие широкий спектр ремонтных и строительных задач [5]. Эти решения включают чертежи, расчеты нагрузок, рекомендации по материалам и климатическим адаптациям.

Применяемые методы ИИ. Интеграция ИИ направлена на автоматизацию следующих ключевых этапов проектирования:

1. **Анализ данных и классификация зданий:**

Использование компьютерного зрения (CV) для обработки визуальной информации (фотографий, чертежей, 3D-сканов) [6] с целью автоматической классификации объекта по заранее определенным типам.

NLP применяется для анализа текстовой документации (архивных отчетов, проектной документации) для извлечения ключевых параметров объекта.

2. **Подбор проектных решений:**

Алгоритмы машинного обучения (ML) используются для поиска и выбора оптимального проектного решения из базы данных на основе характеристик здания.

ML позволяет учитывать специфические условия эксплуатации, такие как ветровые нагрузки, температурные перепады [7] и состояние фундамента.

3. **Адаптация проектных решений:**

Инструменты ИИ корректируют готовое проектное решение с учетом особенностей конкретного объекта, таких как степень износа конструкций или изменения нормативных требований.

Генерация обновленных чертежей и расчетов выполняется автоматически.

4. **Формирование проектной документации**

NLP и CV используются для автоматизации подготовки итоговой документации [8], включая чертежи, сметы и текстовые описания.

Интеграция с ТИМ (BIM). Дополнительно предлагается использование технологий информационного моделирования зданий ТИМ (BIM) для создания интегрированных моделей. ТИМ BIM служит платформой для совместного использования данных проектирования [9], а ИИ улучшает точность и оперативность анализа этих данных.

Каждый этап проектирования описывается как функция, решаемая с помощью ИИ:

F(xCV,xNLP)=y1: автоматическая классификация здания.

F(xML)=y2: подбор проектного решения.

F(xML,xCV)=y3: адаптация готового решения.

F(xNLP,xCV)=y4: генерация проектной документации.

Данная методология позволяет автоматизировать рутинные процессы проектирования, снизить влияние человеческого фактора и обеспечить высокое качество проектных решений для сложных условий Арктической зоны.

Исследование. Проектирование многоквартирных домов (МКД) в Арктической зоне включает последовательные этапы, автоматизация которых с помощью искусственного интеллекта (ИИ) позволяет существенно повысить точность, оперативность и адаптивность проектных решений. В таблице 1 представлена возможная комбинация методов ИИ к отдельным этапам проектирования.

Этапы проектирования и применяемые методов ИИ

№	Этап проектирования	Входные данные	Применяемые методы ИИ	Результат
1	Классификация зданий	Фотографии, чертежи, 3D-сканы, текстовая документация	CV (Computer Vision), NLP (Natural Language Processing)	Определение типа здания (кровля, фасад, этажность)
2	Подбор проектных решений	Тип здания, климатические и эксплуатационные данные	ML (Machine Learning)	Выбор оптимального проектного решения
3	Адаптация проектных решений	Готовое проектное решение, параметры конкретного объекта	ML (Machine Learning)	Обновленное проектное решение, адаптированное к объекту
4	Генерация проектной документации	Адаптированное проектное решение	CV, NLP	Чертежи, спецификации и сметы

Ниже приведены основные этапы проектирования с применением ИИ, ориентированные на учет климатических и эксплуатационных [10] особенностей региона и использование готовых проектных решений.

1. Автоматическая классификация зданий:

На первом этапе система ИИ осуществляет автоматическую классификацию здания по типу кровли, фасада и количеству этажей. Компьютерное зрение (CV) анализирует фотографии, чертежи и 3D-сканы, чтобы определить категорию здания и идентифицировать основные элементы конструкций [11].

Обработка естественного языка (NLP) используется для анализа текстовой документации, включая архивные отчеты и технические паспорта зданий, с целью извлечения информации о предыдущих ремонтных работах и текущем состоянии конструкций.

2. Подбор готовых проектных решений:

На основе результатов классификации система машинного обучения (ML) автоматически подбирает оптимальные проектные решения из базы данных готовых решений для соответствующего типа здания.

Подбор проектного решения осуществляется с учетом климатических условий Арктической зоны, таких как ветровые и снеговые нагрузки [12], а также конструктивные особенности здания. ML-алгоритмы анализируют исторические данные и выбирают решения, которые показали наилучшие результаты в аналогичных условиях.

3. Адаптация проектных решений под конкретный объект:

После выбора подходящего проектного решения ИИ-система адаптирует его с учетом индивидуальных характеристик здания, таких как степень износа конструкций, состояние фундамента и материалов.

Система машинного обучения выполняет корректировки в расчетах нагрузок, подборе материалов и составлении сметы, что позволяет создать проектное решение, оптимально подходящее для конкретного объекта [13].

Например, для здания с высоким уровнем износа будут предложены усиленные материалы или конструктивные элементы, а для здания на вечной мерзлоте — дополнительные меры по укреплению фундамента.

4. Генерация проектной документации:

Система ИИ автоматически формирует проектную документацию, включая чертежи, технические спецификации и сметную документацию, используя NLP для создания текстовых описаний и CV для интеграции визуальных данных.

Интеграция с BIM (Building Information Modeling) позволяет создать цифровую модель здания [14], которая объединяет проектные данные с 3D-моделями. Это обеспечивает единый источник информации для всех участников проекта и позволяет упростить процесс внесения корректировок.

5. Обратная связь и накопление данных:

На каждом этапе система ИИ собирает и анализирует данные о выполненных решениях, что позволяет обновлять базу данных проектных решений, повышая точность и адаптивность будущих проектов.

Постепенное накопление данных также способствует улучшению алгоритмов машинного обучения [15], что в дальнейшем может позволить системе самостоятельно предлагать инновационные проектные решения на основе накопленного опыта и анализа новых строительных технологий.

Эти этапы проектирования с применением ИИ позволяют значительно повысить качество проектных решений, обеспечивая адаптацию проектов под специфические условия Арктической зоны и минимизируя затраты на их разработку и реализацию.

Выводы. По результатам проведенного исследования сформирована блок-схема реализации модели автоматизации проектирования МКД с использованием систем ИИ.



Исследование показало, что интеграция искусственного интеллекта (ИИ) в процесс проектирования многоквартирных домов (МКД) в Арктической зоне позволяет достичь значительных улучшений в скорости, точности и качестве проектных решений. Применение ИИ, в сочетании с разработанной типологией зданий и базой готовых проектных решений, демонстрирует несколько ключевых преимуществ, которые рассмотрены ниже.

1. Повышение скорости проектирования:

Автоматизация процессов, таких как классификация зданий и подбор готовых проектных решений, позволяет сократить время проектирования на каждом этапе. Система ИИ способна анализировать визуальные и текстовые данные намного быстрее, чем традиционные методы, освобождая инженеров от рутинной работы и позволяя сосредоточиться на более сложных задачах.

Благодаря автоматической генерации проектной документации, включая чертежи, расчеты и сметы, процесс создания проекта для каждого типа МКД становится более оперативным. Это особенно важно в Арктической зоне, где погодные условия требуют быстрой реализации всех этапов проектирования и строительства.

2. Оптимизация точности проектных решений:

Применение компьютерного зрения (CV) и машинного обучения (ML) повышает точность классификации зданий и подбора оптимальных проектных решений, что минимизирует риск ошибок на ранних стадиях проектирования.

Использование ML для адаптации проектных решений [16] под конкретные условия объекта (например, степень износа, состояние фундамента) позволяет учитывать мелкие детали, которые могли бы быть упущены в традиционных подходах. Это повышает общую надежность проектных решений и продлевает срок службы конструкций, снижая эксплуатационные и ремонтные затраты.

3. Снижение затрат на проектирование и реализацию:

Готовые проектные решения и возможность их адаптации позволяют существенно сократить затраты на проектирование. База типовых решений охватывает широкий спектр вариантов для различных типов зданий, что исключает необходимость разработки каждого проекта «с нуля».

Автоматизация создания сметной документации на основе готовых решений снижает затраты на проектирование, обеспечивая прозрачность и предсказуемость бюджета. Это также позволяет более точно контролировать расходы на всех этапах проектирования и строительства.

4. Улучшение адаптации проектов к климатическим условиям Арктики:

ИИ-системы учитывают специфические климатические факторы Арктической зоны, такие как низкие температуры, ветровые и снеговые нагрузки, а также вечную мерзлоту. Это позволяет подобрать конструктивные решения и материалы, оптимальные для эксплуатации в экстремальных условиях.

В результате снижается вероятность аварий и повышается устойчивость зданий к климатическим нагрузкам, что особенно важно в условиях постоянного воздействия экстремальных температур и ветров.

5. Постоянное совершенствование системы за счет накопления данных:

Система ИИ автоматически накапливает данные о каждом проекте, включая информацию о типах зданий, климатических условиях, конструктивных решениях и их результативности. Это позволяет обновлять базу данных и улучшать работу алгоритмов, что приводит к более точным и оптимизированным проектным решениям в будущем.

Накопленные данные также позволяют системе адаптироваться к изменениям нормативных требований и появлению новых технологий в строительстве, что делает её гибкой и способной реагировать на изменения в отрасли.

Проведенное исследование показывает, что автоматизация проектирования с применением ИИ особенно актуальна в условиях Арктической зоны, где сложные климатические условия и ограниченные временные окна для проведения работ требуют максимально точных и быстрореализуемых решений. Автоматизация каждого этапа проектирования, от классификации зданий до формирования документации, позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, снижая вероятность ошибок и обеспечивая высокую степень адаптации проектов к специфике региона. Результаты подтверждают, что внедрение ИИ в проектирование способствует значительному снижению трудозатрат, повышению эффективности и качества проектных решений, а также способствует созданию более устойчивых и долговечных зданий для эксплуатации в экстремальных условиях Арктики.

Список литературы

1. Хубаев А.О. Повышение эффективности производства геодезических работ с применением беспилотных летательных аппаратов / А. О. Хубаев, Н. В. Макаев, Н. В. Шевченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 412-418. DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-412-413. EDN UIGYFO.

2. Хубаев А.О. Сравнительный анализ применения современных автоматизированных систем «Умные технологии»: возможности, перспективы / А. О. Хубаев, В. А. Власенко, Н. В. Макаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 571-576. DOI 10.24412/2071-6168-2024-8-571-572. EDN KZPLZS.

3. Методика оценки факторов, влияющих на эффективность реализации строительного проекта генподрядной организацией в направлении Fit-out / Т. Х. Бидов, А. О. Хубаев, Е. А. Помытко, А. Д. Котельникова // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 9. С. 1562-1569. DOI 10.22227/1997-0935.2024.9.1562-1569. EDN WYRLVI.

4. Концепция формирования системы безопасности производства работ при организации строительства гражданских зданий из монолитного железобетона на основе системы искусственного интеллекта / А. А. Лапидус, А. О. Хубаев, Т. Х. Бидов, Д. В. Топчий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 605-609. DOI 10.24412/2071-6168-2024-8-605-606. EDN UUPQYF.

5. Повышение эффективности комплексной безопасности производственных процессов при реализации строительных проектов на основе плат формы мониторинга в условиях Арктики / А. А. Лапидус, Т. Х. Бидов, А. О. Хубаев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 600-605. DOI 10.24412/2071-6168-2024-8-600-601. EDN NYSBZW.

6. Lapidus A. Development of a three-tier system of parameters in the formation of the organizational and technological potential of using non-destructive testing methods / A. Lapidus, A. Khubaev, T. Bidov // E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. Vol. 97. Tashkent: EDP Sciences, 2019. P. 06037. DOI 10.1051/e3sconf/20199706037. EDN HVKPHR.

7. Lapidus A. The study of the calibration dependences used when testing the concrete strength by nondestructive methods / A. Lapidus, T. Bidov, A. Khubaev // MATEC Web of Conferences, Warsaw, 19–21 августа 2017 года. Vol. 117. Warsaw: EDP Sciences, 2017. P. 00094. DOI 10.1051/matecconf/201711700094. EDN XOBULA.

8. Lapidus A. Organizational and technological solutions justifying use of non-destructive methods of control when building monolithic constructions of civil buildings and structures / A. Lapidus, A. Khubaev, T. Bidov // MATEC Web of Conferences. Vol. 251. Moscow: EDP Sciences, 2018. P. 05014. DOI 10.1051/matecconf/201825105014. EDN SOMYVO.

9. Khubaev A. Analysis of physical and mechanical properties of vacuum treated claydite-concrete / A. Khubaev, T. Bidov, A. Rybakova // MATEC Web of Conferences. Vol. 196. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2018. P. 04071. DOI 10.1051/matecconf/201819604071. EDN VBIYIQ.

10. Lapidus A. Regression analysis of the calculation of the organizational and technological potential for the production of cold weather concreting / A. Lapidus, A. Khubaev, T. Bidov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 23, Construction - The Formation of Living Environment, 55 Giai Phong Road, Hanoi. 55 Giai Phong Road, Hanoi, 2020. P. 072033. DOI 10.1088/1757-899X/869/7/072033. EDN XNEVRM.

11. Lapidus A. Development software for the non-destructive control of monolithic structures in housing construction / A. Lapidus, A. Khubaev, T. Bidov // E3S Web of Conferences. Chelyabinsk, 2021. DOI 10.1051/e3sconf/202125809003. EDN BZPTIW.

12. Khubaev A.O. Determination of the effectiveness of the production process of winter concreting based on field studies / A. O. Khubaev // E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023). Vol. 389. Chelyabinsk: EDP Sciences, 2023. P. 06012. DOI 10.1051/e3sconf/202338906012. EDN AYFAOM.

13. Zholtikov A. Improving the efficiency of applying the method of slab and floor lifting / A. Zholtikov, A. Zinovkin, A. O. Khubaev // E3S Web of Conferences : Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023). Vol. 389. Chelyabinsk: EDP Sciences, 2023. P. 01067. DOI 10.1051/e3sconf/202338901067. EDN HHZKAN.

14. Fatullaev R.S. Evaluation of Biotic Damage to Structures as a Risk Factor for Environmental Pollution During a Comprehensive Survey of the Cultural Heritage Site of Regional Significance “The Building of the Izvestia Newspaper” / R. S. Fatullaev, T. Kh. Bidov // XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022" : Collection of materials of the 15th International Scientific Conference. Global Precision Ag Innovation 2022. Vol. 575-2. Rostov-on-Don: Springer Cham, 2023. P. 150-160. DOI 10.1007/978-3-031-21219-2_15. EDN WHPKIP.

15. An Integrated Quality Index of High-Rise Residential Buildings for All Lifecycle Stages of a Construction Facility / A. Lapidus, D. Topchiy, T. Kuzmina [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). 2023. Vol. 13, No. 3. P. 2014. DOI 10.3390/app13032014. EDN IBDZXH.

16. Fatullaev R. Analysis of the labour of roof repair in different countries / R. Fatullaev, T. Bidov, A. Kagazezhev // AIP Conference proceedings: Proceedings of the international conference on engineering research and application 2022 (ICERA 2022). Cairo, Egypt: AIP Publishing, 2023. P. 050019. DOI 10.1063/5.0178176. EDN XDNVLO.

Андар Юрьевич Кагазежев, старший преподаватель, младший научный сотрудник, andarkag@ya.ru, Россия, Москва, Московский государственный строительный университет

CONCEPT OF AUTOMATION OF DESIGN OF CAPITAL REPAIR OF RESIDENTIAL BUILDINGS WITH THE USE OF II SYSTEMS

A.Yu. Kagazezhev

In the harsh climate of the Arctic zone, the design of apartment buildings (ICDs) requires careful consideration of specific factors such as low temperatures, wind and snow loads, and limited timeframes for work execution. This paper proposes a concept for improving the design of MCDs using artificial intelligence (AI) systems based on a previously developed building typology. All ICDs are divided into types based on key parameters: roof type, facade type, number of floors. For each type, ready-made design solutions have been developed, which greatly simplify the design and repair process. It is proposed to use computer vision (CV), machine learning (ML) and natural language processing (NLP) methods for automatic classification of buildings, selection of the most appropriate design solutions from the database and their adaptation to individual features of the object. The automation of these processes will significantly reduce design time, improve the accuracy of calculations and adapt ready-made solutions for complex operating conditions. The results of the study show that the integration of AI into the design process allows to optimize the work of engineers, reducing time and resource costs, as well as improving the quality of design solutions, especially in the extreme climatic conditions of the Arctic.

Key words: apartment buildings, capital repair, artificial intelligence.

Andar Yur'yevich Kagazezhev, senior lecturer, junior researcher, andarkag@ya.ru, Russia, Moscow, Moscow State Construction University

УДК 004.934
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-313-314

РАСПОЗНАВАНИЕ ЭМОЦИЙ В ЗВУКАХ ТОЛПЫ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА СПЕКТРОГРАММ СВЕРТОЧНЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ

П.А. Рудакова, Т.А. Семенов

В статье предлагается метод распознавания эмоций в звуках толпы с использованием сверточных нейронных сетей (CNN) и трансферного обучения. Аудиозаписи толпы преобразуются в мел-спектрограммы, которые затем подаются на предварительно обученную сеть AlexNet, модифицированную для классификации эмоциональных состояний толпы (одобрение, неодобрение, нейтральность). Проведенные эксперименты на наборе данных Emotional Crowd Sound показали высокую точность распознавания эмоций — 92,54%. Результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и указывают на возможность его применения для анализа массовых аудиопотоков в реальных условиях. В заключении обсуждаются перспективы использования различных спектральных шкал и расширения метода на другие наборы данных.

Ключевые слова: распознавание эмоций, мел-спектрограммы, сверточные нейронные сети (CNN), трансферное обучение, функция потерь кросс-энтропии, градиентный спуск.

Исследование, направленное на анализ эмоций в звуковых данных, производимых толпой, представляет значительный интерес в контексте практической применимости и теоретической сложности. Развитие методов распознавания эмоций в аудио-окружении имеет широкий спектр приложений, включая анализ обширного объема видеоданных. Сложность данного исследования присуща нестандартности анализа массовых аудиопотоков, требующей не только углубленного понимания коллективной эмоциональной составляющей, но и адаптации подходов анализа индивидуальных диалогов к многоголосой среде. Сложность анализа эмоций, заложенных в криках толпы, заключается в том, что они не являются простым суммированием отдельных эмоциональных звуков, как это было бы при разговоре одного человека.

Когда люди кричат в толпе, они в основном используют короткие слова или отдельные модулированные высказывания вместе с другими людьми, а также используют специальные звуки, например, освистывание или свист в знак одобрения, или издают звуки, хлопая, ударяя по столам или тряся предметы. Другими словами, они ведут себя и издают звуки как коллективный субъект толпы, например, хор, хотя и без централизованного управления [1]. Более того, в реальных ситуациях, таких как спортивный матч, эмоции разных толп могут смешиваться, например, болельщики забившей и проигравшей команды кричат и шумят вместе. Поэтому мы определяем речь толпы как совокупность одновременных звуков, как голосовых, так и звуковых. Эмоциональное распознавание речи толпы, таким образом, имеет специфические характеристики и требует особого подхода.

Имеет место предположение, что эмоции в звуках толпы характеризуются частотно-амплитудными характеристиками, которые в меньшей степени зависят от отдельных людей; другими словами, все толпы похожи и в каком-то смысле являются одной и той же толпой. Наиболее часто для классификации аудио используют современный метод, который заключается в анализе визуального представления звуков – спектрограмм, – с помощью сверточных нейронных сетей (CNN).

Начиная с набора маркированных данных звуков речи толпы с реальных событий, полученных из видеороликов из открытых источников сети Интернет, визуальные графики, представляющие частотно-масштабные спектрограммы во времени, генерируются из фрагментов, отобранных с помощью скользящих окон по всем исход-

ным клипам [2] звуков толпы. Затем визуальные графики фильтруются и стандартизируются, чтобы сделать их однородными в масштабе и кодировке.

Поскольку низкоуровневый визуальный анализ требует больших вычислительных возможностей с точки зрения времени, памяти и обучающих данных, а специфические особенности набора данных связаны с высокоуровневыми деталями звука, имеет смысл выбрать подход трансферного обучения. Трансферное обучение позволяет использовать предварительно обученную сеть для анализа низкоуровневых характеристик и настраивать сеть на ограниченном количестве конкретных клипов. Таким образом, изображения спектрограмм подаются на предварительно обученную сверточную нейронную сеть (CNN) для изображений на основе AlexNet, [3] которая интегрирована с дополнительными слоями классификации категорий эмоций толпы. Наконец, полностью обученная CNN используется для распознавания эмоций на тестовом наборе спектрограмм.

Ключевым моментом является то, что звук может быть преобразован в образ, кодирующий все релевантные характеристики исходного звука, т. е. в спектрограмму.

Существенные различия между большим набором естественных изображений, которые использовались для предварительного обучения сети, и изображениями спектрограмм могут препятствовать трансферному обучению, поскольку данные находятся в одном и том же пространстве признаков, но с разными распределениями. Более того, что касается других входных звуковых данных, например, речь одного человека, эмоциональные звуки толпы часто имеют небольшие различия между одной категорией и другой, и на них сильно влияет шум окружающей среды. Однако многообещающие результаты предыдущих исследований по трансферному обучению для эмоциональной речи [4], [2] побуждают использовать трансферное обучение для звуков толпы при условии наличия достаточного количества обучающих изображений для этапа тонкой настройки. С другой стороны, использование CNN с последовательным предварительным обучением, например, GoogleNet, AlexNet, должно обеспечить преимущество в виде эффективного распознавания низкоуровневых характеристик изображения, например, форм, краев, распределения цветов, без вычислительных затрат на обучение с нуля.

Организация информационного потока гетерогенного трансферного обучения [5] в предлагаемой системе включает два основных этапа: преобразование звука в спектрограммы и обучение передаче знаний.

Преобразование звука в спектрограмму заключается в том, что вначале берется маркированный звуковой клип различной длительности, затем он дискретизируется блоками по 2 секунды, нормализуются параметры звука и, наконец, из каждого блока генерируется стандартизированная спектрограмма, маркированная эмоцией исходного клипа.

Важно использовать преобразование спектрограмм в мел-спектрограммы.

Когда речь заходит о вычислении высоты звука, спектрограмма становится неотъемлемой частью процесса. Она создается путем последовательного применения оконного преобразования Фурье к небольшим фрагментам речевого сигнала, которые затем умножаются на определенную оконную функцию. Результат этой операции - матрица, в которой каждый столбец представляет спектр короткого участка исходного сигнала. Эта методика обеспечивает представление о частотном содержании звукового сигнала в течение определенного периода времени, что позволяет анализировать и интерпретировать акустическую информацию.

Математически, кратковременное преобразование Фурье (STFT) выражается как:

$$X(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\omega(\tau - t)e^{-i\omega\tau}d\tau,$$

где $x(\tau)$ – входной сигнал, $\omega(\tau - t)$ – оконная функция, ω – частота, t – время.

Известно, что человеческое ухо более чувствительно к изменениям на низких частотах по сравнению с высокими [6]. Например, изменение частоты с 100 Гц на 120 Гц будет более заметным для человека, чем изменение с 10000 Гц на 10020 Гц, которое, скорее всего, не вызовет заметных реакций.

В связи с этим была предложена новая единица измерения высоты звука - мел. Это измерение основано на психофизиологическом восприятии звука человеком и логарифмически связано с частотой. Мел широко используется в акустике для оценки высоты звуков и позволяет более точно оценивать, как человек воспринимает изменения в частоте звука. Соотношение между частотой f в герцах и мел-шкалой m выражается формулой:

$$m = 2595\, log_{10}(1 + \frac{f}{700}).$$

Преобразование сигнала в спектрограмму помогает не только в восприятии человеком звука, но и в машинном анализе аудиоданных. Например, это полезно при анализе речи для распознавания слов или эмоций. Понимание того, как различные частоты влияют на восприятие звука, открывает широкие возможности для его анализа [7].

Трансферное обучение представляет собой довольно стандартный процесс. Исходная CNN модифицируется на последних уровнях, а затем переобучается по изображениям спектрограмм для распознавания эмоциональных меток толпы.

Метод трансферного обучения использует высокий потенциал распознавания сверточных нейронных сетей (CNN), обученных на обширных наборах данных изображений. В данном случае, используется база данных ImageNet, с применением CNN AlexNet, предварительно обученной на ImageNet. Выбор AlexNet обусловлен его высокой эффективностью в распознавании изображений, а также его предыдущим использованием в задаче распознавания эмоций в речи для последующего сравнения [4].

Основная идея заключается в том, что ранние слои хорошо обученных CNN в некоторой степени схожи между собой. Эти ранние слои специализируются на выявлении признаков изображения, начиная от пикселей с высококонтрастными соседями, краев, углов, и заканчивая большими областями с распределением цветов и сложными формами. В соответствии с такой интерпретацией, только последние слои работают с композицией предыдущих признаков, выполняя окончательную категоризацию.

Операция свёртки в CNN определяется как:

$$S(i,j) = (I * K)(i,j) = \sum_m \sum_n I(i-m, j-n)\, K(m,n),$$

где I – входное изображение, K – фильтр (ядро свёртки), $S(i,j)$ – результат свёртки в позиции (i,j).

В качестве функции активации в сверточных нейронных сетях часто используется функция ReLU (Rectified Linear Unit), которая определяется как:

$$f(x) = max(0, x).$$

Эта функция вводит нелинейность в модель и помогает справиться с проблемой исчезающих градиентов.

Фактический трансфер знаний (Knowledge Transfer) [8] осуществляется путем использования CNN, предварительно обученной методом наблюдения на более чем миллионе общих изображений и тысяче категорий. Это происходит путем замены последних слоев одним или несколькими новыми слоями, ориентированными на распознавание различных категорий. Ранние слои такой сети способны извлекать общие признаки, например, края, текстуры и формы, которые являются универсальными для различных типов изображений. Использование этих обобщенных признаков позволяет модели эффективно адаптироваться к новой задаче классификации эмоций в звуках толпы. Кроме того, тонкая настройка модели на новом наборе данных улучшает ее способность распознавать специфические для задачи особенности. Преимущества данного метода связаны со скоростью процесса, более быстрой по сравнению с полным обучением CNN с нуля, и возможностью повторного обучения новым категориям с меньшим объемом образцов изображений, чем необходимо для исходной или новой сети.

В процессе обучения сети используется функция потерь кросс-энтропии, которая измеряет разницу между предсказанным распределением вероятностей и истинным распределением. Функция кросс-энтропии определяется как:

$$L = -\sum_{i=1}^{N} y_i \, log \, \hat{y}_i ,$$

где y_i – истинная метка класса (обычно one-hot кодирование), $\hat{y}_i$ – предсказанная вероятность класса, N – количество классов.

Выходные вероятности модели обычно получают с помощью функции Softmax. Функция Softmax широко используется в многоклассовой классификации для преобразования выходных значений нейронной сети (логитов) в вероятности, которые суммируются до 1. Формула функции Softmax для класса i среди N возможных классов записывается как:

$$\hat{y}_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{k=1}^{N} e^{z_k}}$$

где $\hat{y}_i$ – предсказанная вероятность класса i, z_i – логит для класса i, то есть выходное значение нейронной сети перед применением функции Softmax, N – количество классов.

В процессе оптимизации параметров модели используется алгоритм градиентного спуска, который обновляет веса θ в направлении, противоположном градиенту функции потерь L:

$$\theta = \theta - \eta \nabla_\theta L(\theta),$$

где η – скорость обучения (learning rate), $\nabla_\theta L(\theta)$ – градиент функции потерь по параметрам модели.

В качестве датасета для проведения экспериментов, описанных в статье, использовался набор Emotional Crowd Sound [9], содержащий 68 оригинальных аудио файлов, и разделенный на эмоциональные классы “Одобрение”, “Неодобрение”, “Нейтральность”.

Эксперименты разделены на два этапа, оба из которых используют 80 % звуковых блоков, т. е. спектрограмм, для тонкой настройки CNN, а оставшиеся 20 % - для тестирования/оценки, чтобы также предотвратить и выявить избыточную подгонку.

Первый этап реализует обучение и тестирование на звуковых блоках, случайно выбранных из набора данных. Это стандартный подход для изображений, который также используется в современных работах по распознаванию речевых эмоций [10]. На точность результатов может повлиять тот факт, что при случайном разбиении для обучения и тестирования будут рассматриваться разные блоки одного и того же звукового клипа, возможно, включающие одну и ту же часть клипа, если блоки, сгенерированные с помощью скользящего окна из одних и тех же смежных кадров в 1-секундных окнах, перекрываются. Этот подход слаб для обнаружения избыточной подгонки, поскольку мы не можем предотвратить случайное извлечение алгоритмом одних и тех же перекрывающихся кадров из двух разных смежных блоков. Если они не являются смежными, два блока из одного и того же звукового клипа могут иметь очень похожие характеристики (шум, ритмичный или непрерывный звук, например, хлопки или крики).

Поэтому на втором этапе эксперимента были разделены обучающие и тестовые подмножества, при этом различные исходные файлы были выбраны вручную, с целью получить блоки из разных звуковых клипов.

В ходе эксперимента сеть обучалась в течение шести эпох, используя минибатч размером 5 изображений.

Модель тестировалась на валидационных данных каждые три итерации; обучающие изображения перемешивались в начале каждой эпохи, а валидационные изображения - перед каждым шагом валидации.

Результаты оценивались с помощью метрики точности валидации, которая вычисляется как:

$$Accuracy = \frac{\text{Количество верных предсказаний}}{\text{Общее количество предсказаний}} \times 100.$$

Эксперименты с использованием случайного разделения обучения и проверки показывают, что сеть эффективно справляется с поставленной задачей; для достижения идеальной точности, на наборе данных достаточно трех эпох обучения. При увеличении числа эпох существенного улучшения не происходит, что касается как ошибки обучения, так и валидационной ошибки. С другой стороны, после ручного разделения набора данных, показатели лишь немного снижаются, хотя они более последовательны.

Итоговая оценка точности составила 92,54%.

Этот результат позволяет сделать вывод, что подход на основе трансферного обучения сверточной нейронной сети AlexNet подходит для классификации эмоциональных звуков толпы.

Будущие направления исследования предполагают сравнение экспериментов с использованием различных спектрограммных шкал восприятия подач, отличных от шкалы mel, например, log, bark, erb. Эксперименты также могут быть расширены на другие наборы данных.

Список литературы

1. Ekman P. An Argument for Basic Emotions // Cognition and Emotion. 1992. № 6(3/4). Pp. 169-200.

2. Prasomphan S. Detecting human emotion via speech recognition by using speech spectrogram // 2015 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA). 2015. P. 1–10.

3. Deng J., Dong W., Socher R., Li L.-J., Li K., & Fei-Fei L. ImageNet: A large-scale hierarchical image database // 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2009. P. 248-255. DOI:10.1109/CVPR.2009.5206848 (дата обращения: 10.05.2024).

4. Прокопеня А.С. Сверточные нейронные сети для обработки речи // 57-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники": тезисы докладов. Минск: БГУИР, 2021. С. 14-15.

5. Day O., Khoshgoftaar T. M. A survey on heterogeneous transfer learning // J Big Data. Florida Atlantic University College of Engineering and Computer Science, Boca Raton, USA. 2017. № 4(1). P. 29. DOI:10.1186/s40537-017-0089-0.

6. Stevens S. S., Volkmann J., Newman E. B. A Scale for the Measurement of the Psychological Magnitude Pitch. 1937. 188 p.

7. Мубаракшина Р.Т. Методы и средства распознавания эмоций по голосу // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербург: ФГАОУ "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого". 2019. С. 31-34.

8. Lu Y., Luo L., Huang D., Wang Y., Chen L. Knowledge Transfer in Vision Recognition: A Survey // ACM Comput. Surv. V. 53, № 2. 2020. P. 37.

9. Emotional Crowd Sound [Электронный ресурс]. URL: https://ieee-dataport.org/open-access/emotional-crowd-sound (дата обращения: 10.05.2024).

10. Lech M., Stolar M., Bolia R., Skinner M. Amplitude-Frequency Analysis of Emotional Speech Using Transfer Learning and Classification of Spectrogram Images // Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J. 2018. № 3(4). Pp. 363-371. DOI:10.25046/aj030437.

Рудакова Полина Андреевна, аспирант, swinol.polina1998@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

Семенов Тимофей Александрович, студент, semenov.timofeisemyonov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

EMOTION RECOGNITION IN CROWD SOUNDS THROUGH SPECTROGRAM ANALYSIS BY CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

P.A. Rudakova, T.A. Semenov

The paper proposes a method of emotion recognition in crowd sounds using convolutional neural networks (CNN) and transfer learning. Crowd audio recordings are converted into chalk spectrograms, which are then fed to a pre-trained AlexNet network modified to classify the crowd's emotional states (approval, disapproval, neutrality). The experiments conducted on the Emotional Crowd Sound dataset showed a high emotion recognition accuracy of 92.54%. The results confirm the effectiveness of the proposed approach and indicate that it can be applied to analyse mass audio streams in real-world environments. Finally, the prospects of using different spectral scales and extending the method to other datasets are discussed.

Key words: emotion recognition, chalk spectrograms, convolutional neural networks (CNNs), transfer learning, cross-entropy loss function, gradient descent.

Rudakova Polina Andreevna, postgraduate, swinol.polina1998@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Semenov Timofey Alexandrovich, student, semenov.timofeisemyonov@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.021
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-316-317

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРЕНДОВ

А.С. Сазонова, А.А. Кузьменко, Л.Б. Филиппова, А.А. Курдин

В данной статье представлен анализ методов интеллектуальной аналитики данных, применяемых для исследования статистики популярных видеохостингов. Рассматриваются статистический анализ, кластеризация, машинное обучение и методы обработки естественного языка. Эти методы позволяют выявлять закономерности в поведении аудитории, прогнозировать популярность контента, оптимизировать стратегии продвижения. В статье показано, как применение передовых технологий искусственного интеллекта открывает новые возможности для глубокого понимания предпочтений зрителей и тенденций на видеохостингах. Разработанная информационно-аналитическая система способна извлекать ценные знания из больших данных для принятия эффективных управленческих решений.

Ключевые слова: анализ данных, контент-маркетинг, прогнозирование трендов, искусственный интеллект, машинное обучение, интеллектуальный анализ данных, ChatGPT.

Введение. В настоящее время видеохостинги, играют важную роль в распространении информации и развлекательного контента. Огромные объемы данных, генерируемые этими платформами, открывают широкие возможности для их анализа и извлечения ценных знаний. Актуальность разработки специализированных информационно-аналитических систем для исследования статистики видеохостингов обусловлена рядом факторов.

Глубокий анализ пользовательской активности позволяет выявлять тренды и предпочтения аудитории, что крайне важно для оптимизации контент-стратегии как отдельных блогеров и каналов, так и крупных медиакомпаний. Мониторинг динамики просмотров, лайков, комментариев дает возможность оперативно реагировать на изменение спроса и предлагать зрителям актуальный контент.

Исследование огромного массива данных о видео позволяет определять факторы вирусности и популярности контента в сети. Выявление закономерностей и корреляций между характеристиками видео и откликом аудитории открывает возможности для создания высокоэффективного вирусного контента.

Системы анализа данных видеохостингов незаменимы для оптимизации рекламных кампаний и контент-маркетинга. Изучение охвата аудитории, ее лояльности, конверсий позволяет наиболее выгодно размещать рекламу и создавать вовлекающий контент для продвижения бренда.

Исследование демографии зрителей, географии просмотров, динамики роста каналов посредством инструментов анализа больших данных может быть полезно аналитикам, маркетологам, социологам для изучения тенденций в интернет-среде[6,7].

Таким образом, создание специализированной информационно-аналитической системы для комплексного исследования статистики видеохостингов является актуальной задачей, имеющей весомую практическую значимость. В данной статье на примере платформ YouTube и Rutube рассматриваются подходы к анализу пользовательской активности, выявлению трендов, определению факторов популярности видео контента в интернете.

Теоретический анализ. В разработанной информационно-аналитической системе для изучения статистики видеохостингов реализовано применение методов статистического анализа данных.

На основе собранных количественных характеристик видео, таких как длительность, количество просмотров, лайков и комментариев, в системе рассчитываются статистические показатели - среднее значение, медиана, дисперсия [1]. Это позволяет получить общую картину распределения метрик видео и выявить общие закономерности.

Среднее значение:

$$\boldsymbol{mean\_views} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{n}}\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{views\_list_i}, \quad (\mathbf{1})$$

где *n* - количество элементов в списке *views_list*.

Медиана:

$$\boldsymbol{N} = \frac{\boldsymbol{views\_count} + \mathbf{1}}{\mathbf{2}}, \quad (\mathbf{2})$$

где *views_count* - количество просмотров.

Дисперсия:

$$\boldsymbol{variance\_views} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{n}}\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} (\boldsymbol{views\_list_i} - \boldsymbol{mean\_views})^{\mathbf{2}}, \quad (\mathbf{3})$$

где *n* обозначает общее количество элементов в наборе данных, *views_list* представляет собой отдельный элемент в наборе данных просмотров, *mean_views* обозначает среднее значение (среднюю арифметическую) для набора данных просмотров

Для наглядного представления распределений используются гистограммы[9]. В системе реализован расчёт корреляции Пирсона между различными характеристиками видео.

$$\boldsymbol{correlation\_views\_likes} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (\mathbf{4})$$

где $\boldsymbol{x_i}$ - элемент из списка *views_list*, $\boldsymbol{y_i}$ - элемент из списка *likes_list*, $\bar{\boldsymbol{x}}$ - среднее значение списка *views_list*, $\bar{\boldsymbol{y}}$ - среднее значение списка *likes_list*, *n* - количество элементов в списках *views_list* и *likes_list*,

Это дает возможность определить наличие статистически значимых взаимосвязей, например, между длительностью видео и количеством просмотров или лайков. Данная взаимосвязь представлена на рисунке 1.

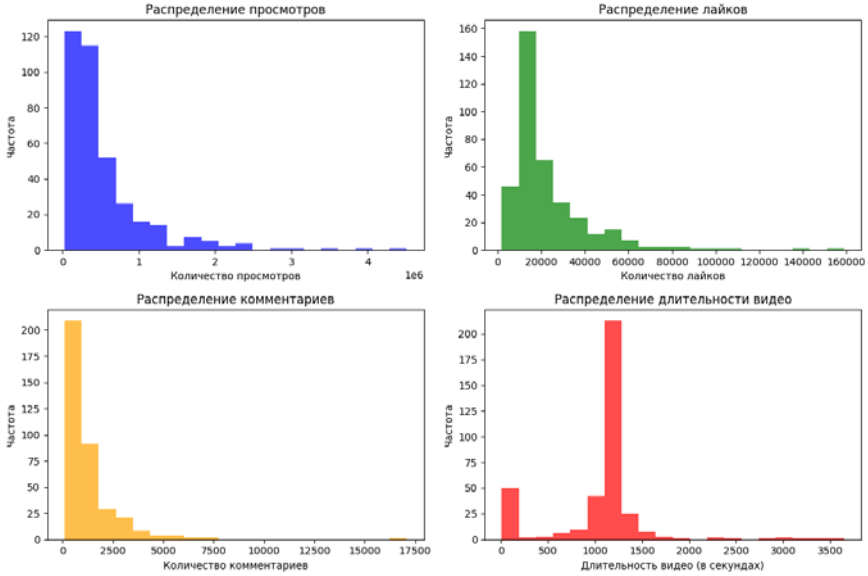


Рис. 1. Визуальное представление распределения данных

Ещё одна реализованная возможность - сравнение усредненных метрик для разных категорий видео представлена на рисунке 2. Это помогает выявлять более и менее популярные тематики контента.

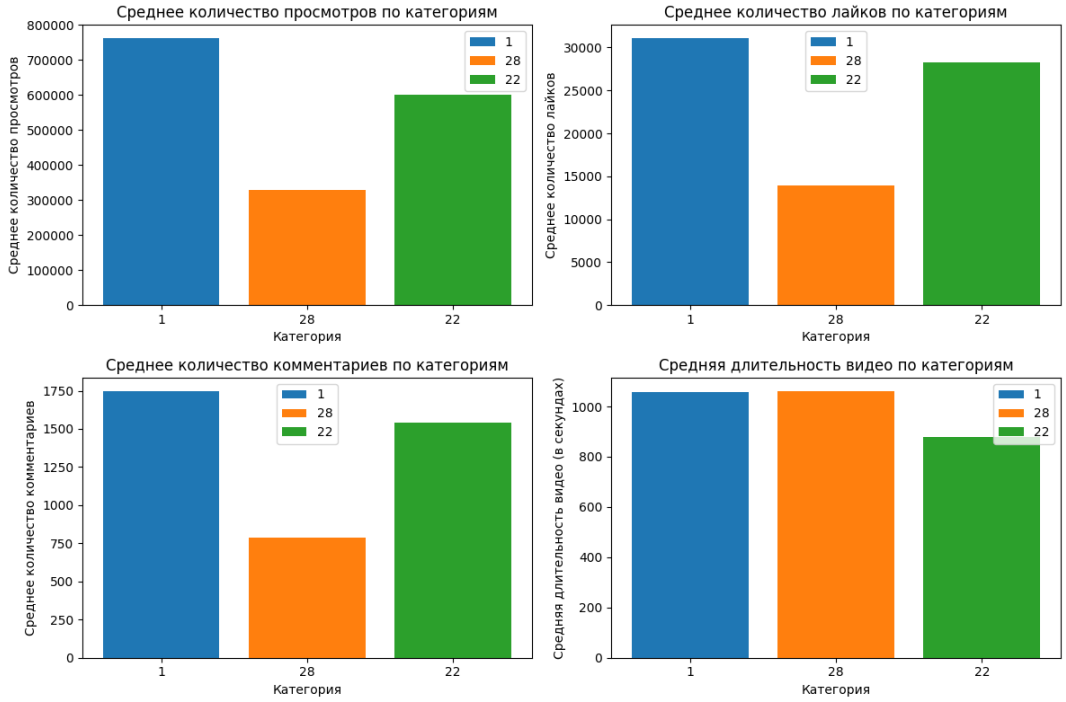


Рис. 2. Визуализация усредненных метрик по категориям

Кроме анализа пользовательской активности на видеохостингах, в рамках разработанной информационно-аналитической системы осуществляется также глубокий статистический анализ данных новостных ресурсов за текущее время[5,8]. Пример работы программы: «Исходя из представленных данных, можно сделать вывод, что в данный момент популярностью пользуется информация о химических реакциях и процессах, связанных с использованием водорода в области возобновляемых источников энергии. В частности, интерес вызывают изучение процессов водородной электролиза, а также понимание основ химических реакций.»

Таким образом, использование статистического анализа данных позволяет нашей системе раскрывать общие закономерности и тенденции, полезные для понимания поведения аудитории видеохостингов.

Кластерный анализ - еще один эффективный метод интеллектуальной аналитики, используемый в нашей системе для исследования данных видеохостингов. Одним из ключевых инструментов кластерного анализа является евклидово расстояние, измеряющее схожесть между объектами. Формула евклидова расстояния выглядит следующим образом:

$$\boldsymbol{d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2},} \qquad \textbf{(5)}$$

где *x* и *y* - векторы признаков объектов, а *n* - количество признаков. График представлен на рисунке 3.

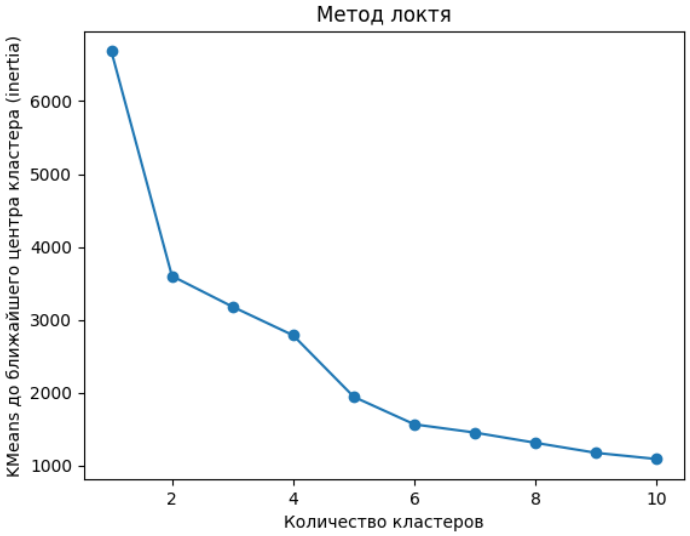


Рис.3. Метод локтя

Важным элементом кластерного анализа является также центр масс кластера, вычисляемый как среднее значение объектов в кластере:

$$\boldsymbol{\mu_j} = \frac{\mathbf{1}}{|\boldsymbol{C_j}|}\sum_{\boldsymbol{x}} \in \boldsymbol{C_j^x}, \quad (\mathbf{6})$$

где $\boldsymbol{C_j}$ - множество объектов в кластере j, а $|\boldsymbol{C_j}|$ - количество объектов в кластере j.

Для оценки качества кластеризации используется функционал J, который представляет собой сумму квадратов отклонений объектов от центра своего кластера (он же метод локтя):

$$\mathbf{J} = \sum_{\boldsymbol{j=1}}^{\boldsymbol{K}}\sum_{\boldsymbol{x}} \in \boldsymbol{C_j}||\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\mu_j}||^{\mathbf{2}}, \quad (\mathbf{7})$$

где K - количество кластеров, $\boldsymbol{C_j}$ - множество объектов в кластере j, $\boldsymbol{\mu_j}$ - центр масс кластера j, а $\|\cdot\|$ - норма (в данном случае, евклидова норма).

Суть кластерного анализа заключается в разбиении совокупности данных на группы (кластеры) таким образом, чтобы объекты внутри группы были схожи между собой, а объекты из разных групп – различались [2,10].

В контексте анализа видео, кластеризация может применяться для группировки похожих видео по тематике, жанрам, используемым хештегам и другим признакам. Также возможно сегментирование аудитории по возрасту, полу, географии и другим характеристикам. На рисунке 4 видна взаимосвязь количества комментариев от времени выхода видеоролика.

Он позволяет разделять видео и зрителей на сегменты для более точечного таргетирования контента и повышения лояльности аудитории. Это ценный инструмент для принятия маркетинговых и стратегических решений владельцами видеоканалов и рекламодателями.

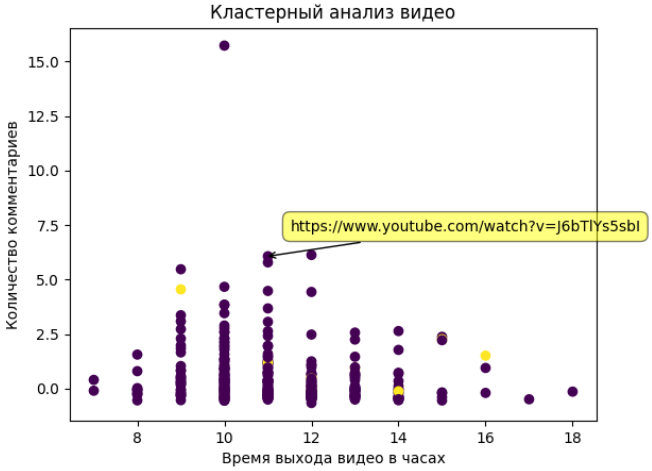


Рис. 4. Кластерный анализ зависимости комментариев от времени выхода

При изучении данных о запросах в поисковых системах по определенной теме в различных странах, применяется группировка стран по сходным характеристикам потребления и создание персонализированного контента для каждого кластера. Также доступна группировка не только по странам, представленная на рисунке 5 но и районам и городам. Данные для анализа берутся из статистических сайтов, а также происходит парсинг из новостных ресурсов.

В добавок к этому на рисунке 6 представлена диаграмма интереса к данным темам за определенный период.

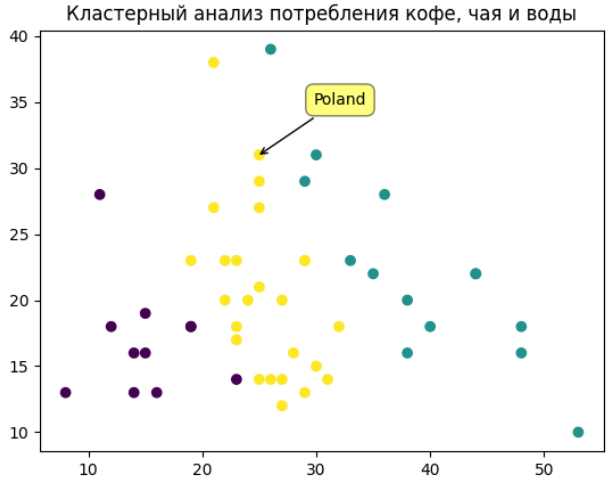


Рис. 5. Кластерный анализ

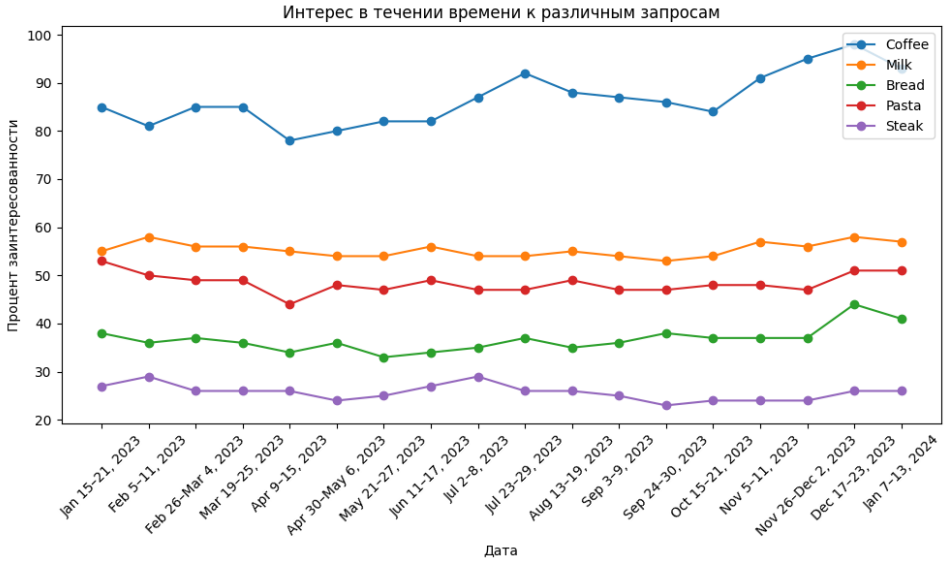


Рис. 6. Диаграмма интереса за определенный период

На основе предоставленных данных можно сделать следующие выводы и предсказания:

1. Геополитические конфликты:
Тема войны в Израиле и Палестине, а также упоминания о возможной гражданской войне в России, свидетельствуют о высокой заинтересованности людей в геополитических конфликтах. Это может привести к росту интереса к подобным конфликтам в других регионах, таких как Южная Азия, Ближний Восток, Латинская Америка и Африка.

2. Темы мировых войн и фантастических сценариев:
Упоминания о "войне миров" и "войне судного дня" могут указывать на интерес к фантастическим сценариям и постапокалиптическим историям. Этот тренд может привести к увеличению популярности книг, фильмов и игр, посвященных подобным темам.

3. Актуальные темы в киноиндустрии:
Упоминания о фильмах "Война и мир" и "Фильм война" указывают на интерес общества к киноиндустрии и желание узнать о новых кинопремьерах. Возможно, в ближайшие месяцы мы увидим новые фильмы, основанные на исторических событиях или фантастических сюжетах.

4. Обращение к истории:
Упоминания о Первой и Второй мировых войнах, а также о Великой Отечественной войне и гражданской войне, могут свидетельствовать о возросшем интересе к историческим событиям. Это может привести к увеличению популярности исторических романов, документальных фильмов и образовательных программ о прошлом.

5. Влияние социальных сетей:
Упоминания о темах, связанных с телеграмом и поиском онлайн контента (например, "смотреть онлайн вконтакте"), указывают на значительное влияние социальных сетей на интересы пользователей. Это может означать более высокую популярность онлайн-платформ, таких как стриминговые сервисы, социальные медиа и мессенджеры.

Исходя из вышеперечисленных данных, можно предположить, что в ближайшие 3-6 месяцев мы увидим увеличенный интерес к геополитическим событиям, фантастическим сценариям, киноиндустрии, историческим событиям и влиянию социальных сетей на информационную среду.

Рис. 7. Прогнозирование результатов

Для анализа тональности комментариев использовалась модель BERT, обученная на большом корпусе текста на русском языке.

Результат анализа:
- 56% комментариев имеют нейтральную тональность
- 22% комментариев имеют положительную тональность
- 22% комментариев имеют отрицательную тональность

Рис. 8. Анализ комментариев

Текстовый анализ и обработка естественного языка являются важными методами интеллектуальной аналитики данных, применяемыми в нашей системе для исследования новостей и трендов в социальных сетях [3,11].

Цель использования этих методов - выявление скрытых тематик и предсказание будущих популярных направлений на основе анализа неструктурированных текстовых данных из новостей и постов в соцсетях.

Для начала работы пользователю необходимо определится с ключевой темой, по которой будет происходит поиск информации для дальнейшей обработки данных.

Затем выполняется этап предобработки данных, удаляются стоп-слова, приводятся к начальной форме. С помощью алгоритмов машинного обучения извлекаются ключевые слова, определяются скрытые темы, анализируются эмоциональная окраска текстов и упоминания различных объектов [4]. В частности, используется модель: gpt-3.5-turbo. На рисунке 7 прогнозирование результатов по ключевой теме «Война».

Комбинирование этих методов во временном контексте позволяет системе находить набирающие популярность темы и прогнозировать будущие тренды исходя из тональности и динамики обсуждений в новостях и социальных сетях. Это мощный инструмент анализа тенденций.

В системе также успешно применяется анализ комментариев с использованием моделей естественного языка, в частности, таких как BERT. Текстовый анализ и обработка естественного языка представляют собой ключевые методы в интеллектуальной аналитике данных, используемые для исследования новостей и трендов в социальных сетях. На рисунке 8 представлен анализ комментариев.

Заключение. В статье представлен обзор методов интеллектуального анализа данных, применяемых для исследования статистики популярных видеохостингов.

Рассмотренные подходы - статистический анализ, кластеризация, машинное обучение и методы обработки естественного языка, демонстрируют широкие возможности глубокого изучения поведения аудитории видеохостингов и выявления ценных знаний в больших данных.

Применение передовых технологий анализа данных, позволяют выявлять скрытые закономерности в предпочтениях зрителей, прогнозировать вирусность и популярность контента, оптимизировать продвижение каналов и рекламных кампаний.

Разработанная информационно-аналитическая система интеллектуального анализа статистики видеохостингов открывает новые перспективы для принятия эффективных управленческих решений владельцами каналов, маркетологами, социологами. Дальнейшее развитие методов искусственного интеллекта расширит возможности системы для извлечения полезных знаний и прогнозирования тенденций.

Список литературы

1. Статистический анализ. [Электронный ресурс]: URL: https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/analyze/commonly-used-tools/statistical-analysis.htm (дата обращения: 10.05.2024).
2. Кластеризация. [Электронный ресурс] URL: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=%D0%9A%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86% (дата обращения 10.01.2024).
3. Что такое обработка естественного языка (NLP). [Электронный ресурс]: URL: https://aws.amazon.com/ru/what-is/nlp (дата обращения: 10.01.2024).
4. Изучение и анализ данных с помощью Python. [Электронный ресурс] URL: https://learn.microsoft.com/ru-ru/training/modules/explore-analyze-data-with-python (дата обращения: 10.01.2024).
5. Багдади М.А. Обзор возможностей и сравнение языков программирования python и r в области анализа данных / М.А. Багдади, Б.А. Мархабаев // Инновационные механизмы управления цифровой и региональной экономикой. г. Москва, 2023. С. 282-294.
6. Воробьева А.А. Анализ данных с помощью web scraping python // ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина». Тамбов, 2022. С. 533-544.
7. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ : учебное пособие для вузов / В. И. Аверченков, А. В. Аверченков, А. А. Жолобов [и др.]. Том Часть 1. 2-е издание, стереотипное. Москва: ООО "ФЛИНТА", 2011. 216 с. EDN SDQWMD.
8. Управление данными: лабораторный практикум / А. С. Сазонова, А. А. Кузьменко, Л. Б. Филиппова [и др.]. Москва: ООО «Директ-Медиа», 2022. 60 с. DOI 10.23681/691722. EDN KGRWNR.
9. Аверченков В.И. Оценка точности автоматизированной настройки режущего инструмента при обработке на станках с ЧПУ / В. И. Аверченков, Л. Б. Филиппова // Инженерия поверхности и реновация изделий : Материалы 11-й Международной научно-технической конференции, Ялта, 23–27 мая 2011 года. – Ялта: Ассоциация технологов-машиностроителей Украины, 2011. С. 6-8. EDN VUEOMX.
10. Филиппов Р.А. Применение микроконтроллера arduino mega 2560 для автоматизации работы микроскопа LEICA DM IRM / Р. А. Филиппов, Л. Б. Филиппова, Ю. А. Леонов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении : сборник научных статей Всероссийской конференции. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2021. С. 210-213. EDN YQUZWE.
11. Разработка аналитического инструментария для системы поддержки принятия решений тренера по баскетболу / А. С. Сазонова, Р. А. Чумаков, Ю. А. Леонов, Л. Б. Филиппова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 549-553. DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-549-550. EDN BKZQOO.

Сазонова Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, asazonova@list.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Кузьменко Александр Анатольевич, канд. биол. наук, доцент, alex-rf-32@yandex.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Филиппова Людмила Борисовна, канд. техн. наук, доцент, libv88@mail.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Курдин Артем Алексеевич, студент, libv88@yandex.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет

MODELS AND METHODS FOR ANALYZING WEATHER CHANGES UNDER THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL FACTORS

A.S. Sazonova, A.A. Kuzmenko, L.B. Filippova, A.A. Kurdin

This article presents an analysis of the methods of intelligent data analytics used to study the statistics of popular video hosting sites. Statistical analysis, regression analysis, clustering, machine learning, time series analysis, network analysis and natural language processing methods are considered. These methods allow us to identify patterns in audience behavior, predict the popularity of content, and optimize promotion strategies. The article shows how the use of advanced artificial intelligence technologies opens up new opportunities for a deep understanding of viewers' preferences and trends on video hosting sites. The developed information and analytical system is able to extract valuable knowledge from big data for making effective management decisions.

Key words: data analysis, content marketing, trend forecasting, artificial intelligence, machine learning, data mining, ChatGPT.

Sazonova Anna Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, asazonova@list.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Kuzmenko Alexander Anatolyevich, candidate of biological sciences, docent, alex-rf-32@yandex.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Filippova Lyudmila Borisovna, candidate of technical sciences, docent, libv88@mail.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Kurdin Artyom Alekseevich, student, libv88@yandex.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University

УДК 04.056
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-322-323

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОВЕРКИ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСИ НА ОСНОВЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ КРИВЫХ

В.С. Павлова

В работе рассмотрены алгоритмы формирования и проверки электронной подписи на основе ГОСТ 34.10-2018, ECDSA(Elliptic Curve Digital Signature Algorithm)и СТБ 34.101.45-2013 и представлены результаты исследования по применимости алгоритмов в различных условиях реализации. Исследование проводилось с помощью программной реализации алгоритмов на языке программирования Python. Результаты исследования могут быть для применения на различных объектах, подлежащих защите.

Ключевые слова: электронная подпись, эллиптические кривые, схема Шнорра, ГОСТ 34.10-2018, ECDSA, СТБ 34.101.45-2013

С развитием цифровых технологий растёт необходимость в контроле целостности данных, доказательстве их подлинности и защите от подделки. Для удовлетворения данным потребностям в настоящее время в автоматизированных системах применяются алгоритмы проверки с использованием электронной цифровой подписи. Под *электронной подписью* (ЭП) понимается раздел электронного документа, с помощью которого подтверждается авторство, время подписания документа и его неподдельность. Согласно ГОСТ 34.10-2018, общепризнанная схема генерации электронной подписи состоит из следующих этапов [1]:

1. Генерация ключей (подписи и проверки подписи);
2. Формирование подписи;
3. Проверка подписи.

После подписания сообщения к нему добавляется электронная подпись размером 512 или 1024 бит, и текстовое поле. В текстовом поле могут содержаться метаданные отправителя, в частности, дата и время передачи сообщения. Схематическое представление сообщения, верифицированного с помощью ЭП, показано на рисунке 1:

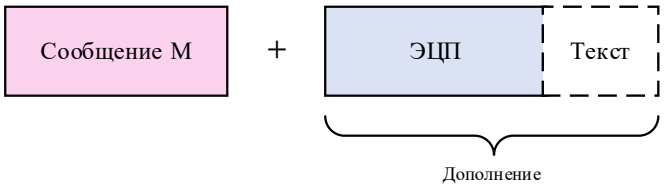


Рис. 1. Схема сообщения, подписанного электронной цифровой подписью

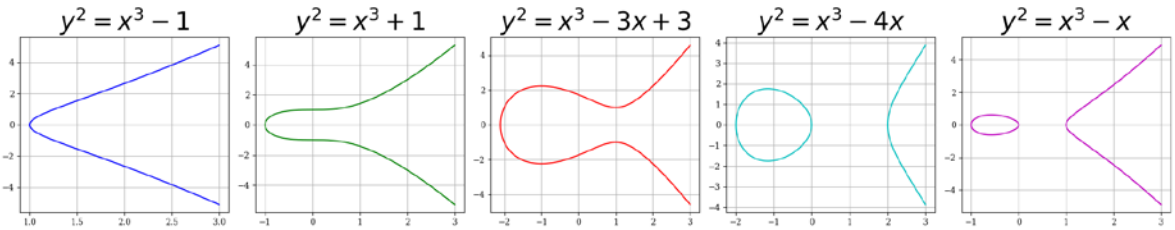


Рис. 2. Эллиптические кривые различных форм

Основным объектом всех рассматриваемых методов является ***эллиптическая кривая*** E, которая задаётся уравнением [1]:

$$y^2 = x^3 + ax + b, \quad (1)$$

где a и b – параметры кривой. Указанная форма записи называется уравнением Вейерштрасса [2]. В зависимости от параметров (a, b) кривые $E(a, b)$ могут принимать формы, приведенные на рисунке 2:

Отметим, что в криптографических системах с открытым ключом используются ***эллиптические кривые над конечным полем*** – множеством целых чисел по некоторому большому простому модулю P [2]. Множество точек эллиптической кривой является группой, если принять, что существует ***бесконечно удалённая точка***, лежащая на этой кривой и обозначаемая O (∞, ∞). Тогда выполняются все требования группового закона:

1. Существует нейтральный элемент – это бесконечно удалённая точка O;
2. Для любой точки существует обратная величина – точка, симметричная ей относительно оси абсцисс;
3. Существует правило, определяющее операцию сложения: сумма трёх ненулевых точек A, B и C, лежащих на одной прямой, будет равна $A + B + C = O$.

Множество точек эллиптической кривой (ЭК) над конечным полем F_p определяется в соответствии с выражением (2):

$$\{(x, y) \in Z_P \mid y^2 = x^3 + ax + b \ (mod\ p), \\ 4a^3 + 27b^2 \neq 0 \ (mod\ p)\} \cup \{O\} \quad (2)$$

где $a, b \in F_p$, а O – точка в бесконечности.

При указанных условиях график кривой перестаёт быть гладким и «распадается» на множество дискретных точек, как показано на рисунке 3.

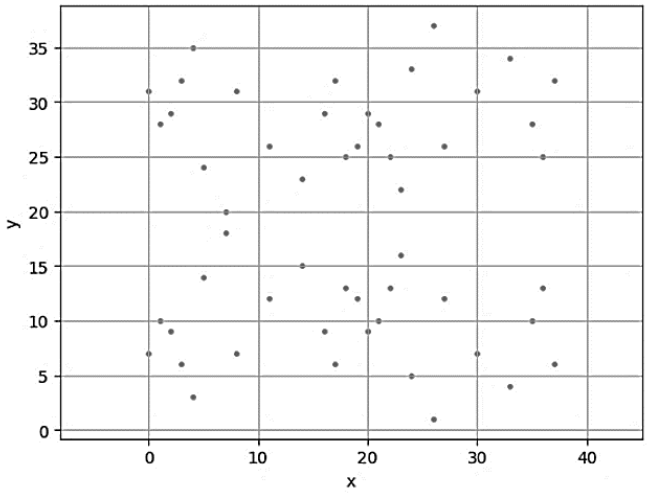


Рис. 3. График эллиптической кривой над конечным полем

Существуют различные криптографические протоколы на основе эллиптических кривых, которые используются для формирования и проверки электронной подписи. Данное исследование направлено на выявление применимости отечественных криптографических протоколов в современных условиях ограниченности использования западных криптографических стандартов и снижением уровня доверия к ним. В целях исследования производительности алгоритмов схем формирования цифровой подписи были выбраны следующие алгоритмы:

1. ГОСТ 34.10-2018 (Россия);
2. ECDSA (США);
3. СТБ 34.101.45-2013 (Беларусь).

Основная схема алгоритмов совпадает с общепринятой [1], но у каждого алгоритма есть свои особенности и требования к входным данным. Рассмотрим действующий межгосударственный криптографический стандарт ГОСТ 34.10-2018, разработанный на основе национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 34.10-2012 [3]. Процесс формирования электронной подписи связан с заданием кривой $E_p(a, b)$ над полем простых чисел F_p с помощью *инварианта* $J(E)$. Инвариант определяется на основании выражения (3):

$$J(E) = 1728\frac{4a^3}{4a^3 + 274b^2}(mod\ p) \quad (3)$$

В соответствии с известным инвариантом строится эллиптическая кривая, коэффициенты (a, b) которой будут определяться следующим образом (4):

$$a = 3k(mod\ p) \\ b = 2k(mod\ p)' \quad (4)$$

где $k = \frac{J(E)}{1728 - J(E)}, J(E) \neq 0, J(E) \neq 1728$.

Ещё одной отличительной особенностью алгоритма является наличие следующего требования ко входным данным: простое число q – порядок циклической подгруппы группы точек эллиптической кривой $E_p(a, b)$, для которого выполнены условия (5):

$$\begin{cases} m = nq, n \in Z, n \geq 1, \\ 2^{254} < q < 2^{256} \text{ или } 2^{508} < q < 2^{512} \end{cases}, \quad (5)$$

Где целое число m – порядок группы точек эллиптической кривой E.

В алгоритме используется хэш-функция $H(M) = h$, которая отображает сообщение M произвольной длины в двоичный вектор h фиксированной длины l бит. Хэш-функция определена в ГОСТ 34.11-2012 [4]. Как и в дру-

гих алгоритмах формирования ЭП, каждый пользователь должен иметь ключ подписи (закрытый ключ) d и ключ проверки подписи (открытый ключ) $Q(x_q, y_q) = dP$. Далее выполняются некоторые вычисления с использованием псевдослучайных чисел. На выходе получается набор байт – цифровая подпись, которая передаётся вместе с сообщением и проверяется путем сравнения подписи со значениями, вычисленными принимающей стороной с использованием сообщения и открытого ключа отправителя.

Алгоритм формирования и проверки электронной цифровой подписи с открытым ключом под названием *ECDSA* во многих приложениях является стандартом, в частности, используется для подписания транзакций в криптовалютах, платежных системах, а также системах аутентификации. Алгоритм принят множеством международных и национальных стандартов, особенно распространен в западных странах [5].

В качестве хэш-функции обычно используется алгоритм SHA-256, который входит в стандарт Национального института стандартов и технологий США (FIPS PUB 180-4**:** Secure Hash Standard). Как и в ГОСТ Р 34.10-2012, для формирования электронной подписи в ECDSA выполняются некоторые вычисления с точками эллиптической кривой с использованием псевдослучайных чисел. На выходе получается набор байт – электронная подпись, которая проверяется принимающей стороной с использованием сообщения и открытого ключа отправителя.

Один из критических важных аспектов для приведённых выше алгоритмов – необходимость использования криптографически стойких случайных чисел при выборе k. Использование повторяющихся или предсказуемых значений может привести к раскрытию закрытого ключа [6]. Стойкость рассмотренных выше криптографических протоколов основывается на сложности дискретного логарифмирования в группе точек эллиптической кривой и на стойкости используемых функций хэширования. Уровень l определяет длины параметров, ключей, подписей, а также быстродействие алгоритмов ЭП. Следует учитывать, что с ростом параметра l, повышается стойкость и пропорционально снижается быстродействие алгоритмов. Добавим, что стойкость алгоритмов ЭП определяется уровнем $l \in \{128, 192, 256\}$. На уровне l для подделки ЭП злоумышленнику требуется выполнить порядка 2^l операций, таким образом сложность данной задачи может быть оценена асимптотически как $O(2^l)$. График такой функции представлен на рисунке 4.

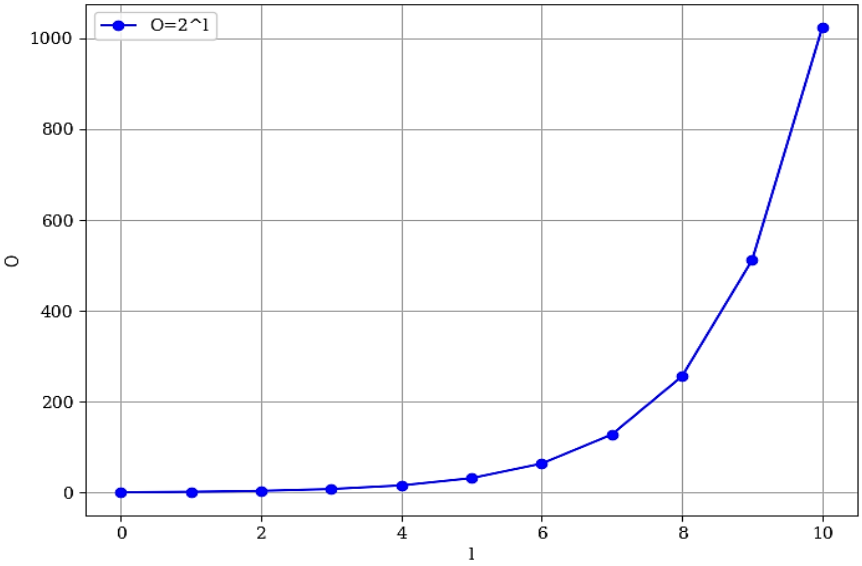


Рис. 4. Скорость роста функции $O(2^l)$

Отечественный криптографический стандарт Республики Беларусь СТБ 34.101.45-2013 построен на основании *схемы Шнорра* [6], которая является одной из наиболее эффективных [7] и теоретически обоснованных [8] схем формирования и проверки электронных цифровых подписей.

Отличительной особенностью данного алгоритма является требование к модулю эллиптической кривой: $2^{2l-1} < p < 2^{2l}$, $p \equiv 3\ (mod\ 4)$. Сама кривая должна быть задана коэффициентами $(a, b) \in F_p$, причём $a \neq 0, \frac{b}{p} = 1, 4a^3 + 27b^2 \not\equiv 0\ (mod\ p)$. На порядок кривой q также налагаются ограничения: q – простое, $2^{2l-1} < q < 2^{2l}, q \neq p, q$ не делит числа вида $p^m - 1$ для $m = 1,2 \ldots 50$. Точка-генератор $G \neq O$ должна быть точкой вида $G = (0, y_G)$, где $y_G = b^{\frac{p+1}{4}} (mod\ p)$. В качестве хэш-функции обычно используется алгоритм belt-hash, определенный в СТБ 34.101.31.

Алгоритм оперирует таким понятием, как *идентификатор* $OID(H)$ – кодовое представление сообщения, полученное в соответствии с ГОСТ 34.973, ГОСТ 34.974. При использовании belt-hash это значение всегда равно $06092A7000020022651F51_{16}$. Сам алгоритм формирования цифровой подписи использует логические и арифметические операции с точками кривой и псевдослучайными числами, в результате которых на выходе получается цифровая подпись фиксированной длины $3l$. Проверка цифровой подписи на проверяющей стороне включает в себя не только сравнение с вычислениями на основе открытого ключа, но и контроль длины полученного значения подписи. При отклонении длины подписи от стандартной длины в $3l$ бит цифровая подпись считается недействительной.

Для достижения цели исследования было проведено тестирование алгоритмов формирования и проверки электронной подписи. Тестирование проводилось с использованием объёма памяти не менее 16 Гб и частотой тактирования не ниже 2.3 ГГц. Для проведения экспериментов с алгоритмами ГОСТ Р 34.10-2012 и ECDSA была использована кривая SECP256k1, которая является наиболее подходящей согласно требованиям, предъявляемым к набору входных данных обоих алгоритмов. Параметры данной кривой указаны в таблице 1.

Таблица 1

Параметры эллиптической кривой SECP256k1

Параметр	**Значение**
Модуль p	FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFE FFFF $FC2F_{16}$
Коэффициенты (a, b)	(0,7)
Порядок группы q	FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFE BAAE DCE6 AF48 A03B BFD2 5E8C D036 4141_{16}
Точка-генератор G	x_G = 79BE 667E F9DC BBAC 55A0 6295 CE87 0B07 029B FCDB 2DCE 28D9 59F2 815B $16F8_{16}$ y_G = 483A DA77 26A3 C465 5DA4 FBFC 0E11 08A8 FD17 B448 A685 5419 9C47 D08F FB10 $D4B8_{16}$

Для использования СТБ 34.101.45-2013 кривая SECP256k1, параметры которой приведены в таблице 1, не применима ввиду особых требований алгоритма, предъявляемых к параметрам кривой. Рекомендованные стандартом параметры кривой указаны в таблице 2.

Таблица 2

Рекомендованные СТБ 34.101.45-2013 параметры ЭК

Параметр	**Значение**
Модуль p	FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF $FF34_{16}$
Коэффициенты (a, b)	a = FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF $FF04_{16}$ b = 77EC C651 513F 8ADE 2D1C A3BA 4E8D BFEB C45F 0596 79B8 2935 2BE2 D7B6 6DC9 $301F_{16}$
Порядок группы q	FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF FFFF 9DC5 E86D D0BF D4CF E7A5 FB99 62D3 6670_{16}
Точка-генератор G	x_G = 0 y_G = B67F CFC3 BF61 6DF9 C54E 9C3A 156D 38D5 8719 9366 4C80 6F25 E192 FC81 4015 $A639_{16}$

Отобранные для эксперимента кривые, несмотря на отличающиеся значения параметров, сопоставимы по своему уровню стойкости в битах, поскольку для схем на эллиптических кривых этот показатель приблизительно равен половине длины ключа. Ключ подписи во всех протоколах используется одинаковый с длиной 64 бит.

В ходе эксперимента по выявлению применимости алгоритмов было проведено сравнение по следующим критериям:

1. Время работы алгоритма в миллисекундах;
2. Объём потребляемой в процессе работы памяти в килобайтах.

Алгоритмы были реализованы на языке программирования Python с использованием готовых реализаций алгоритмов хэширования. Результат данного эксперимента приведён в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение времени работы и объёмов используемой памяти алгоритмов формирования и проверки ЭП

	ГОСТ Р 34.10-2012 (SECP256k1)	ECDSA (SECP256k1)	СТБ 34.101.45-2013 (стандарт)
Время, мс	53.82	45.85	557.21
Память, кБ	40268.00	40632.00	41044.00

Рассматриваемые протоколы электронной подписи на основе эллиптических кривых получили большое распространение, поскольку позволяют обеспечить такие свойства информации как целостность, подлинность и неотказуемость, сочетая высокую стойкость с эффективным использованием ресурсов. Это связано с тем, что математический аппарат эллиптических кривых позволяет получать конечные абелевы группы с удовлетворительными для целей криптографии параметрами, обеспечивая ту же криптостойкость при меньшей длине ключа.

Как видно из таблицы 3, наиболее быстрым оказался алгоритм ECDSA, а наиболее медленным – стандарт СТБ 34.101.45-2013, который потребовал значительно больше времени для выполнения. Такое существенное увеличение времени исходит из более сложной реализации вычислительных процедур как самого алгоритма формирования и проверки ЭП, так и функции хэширования. Наименьший объём памяти был затрачен при реализации алгоритма ГОСТ Р 34.10-2012.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать выводы о применимости соответствующих алгоритмов в различных условиях реализации. Так, для устройств с низкой пропускной способностью, например IoT, наилучшим вариантом остаётся протокол ECDSA, который часто используется в устройствах IoT из-за высокой эффективности и относительно короткой длины ключей, что уменьшает нагрузку на сеть и процессор. ГОСТ Р 34.10-2012 можно использовать в системах, требующих гарантированной безопасности и долгосрочной устойчивости алгоритма, например, в финансовых или государственных системах анонимной идентификации. Стандарт СТБ 34.101.45-2013 демонстрирует значительно большее время исполнения по сравнению с другими двумя алгоритмами, и он также использует больше памяти, однако в нём применяются более сложные и, как следствие, более безопасные вычислительные операции. Это может казаться избыточным, однако данный алгоритм может подойти для систем, где ключевым является уровень безопасности, а не скорость работы. Например, это применимо в инфраструктурах критической важности (КИИ), где дополнительные затраты времени и ресурсов оправданы для достижения максимальной защищённости данных. Более того, данный стандарт, как и ГОСТ Р 34.10-2012, приобретает ещё большую актуальность применения для стран СНГ в условиях ограничений на использование западных криптографических стандартов или отсутствия доверия к ним. СТБ и ГОСТ предоставляют собственный подход к защите данных, который можно контролировать и регулировать на национальном уровне.

Список литературы

1. ГОСТ 34.10-2018. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Процессы формирования и проверки электронной цифровой подписи. - М.: Издательство стандартов, 2018.

2. Болотов А. А., Гашков С. Б., Фролов А. Б., Часовских А. А. Элементарное введение в эллиптическую криптографию. Том 1. Алгебраические и математические основы. М.: Ленанд, 2019. 376 с.

3. ГОСТ Р 34.10-2012. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Процессы формирования и проверки электронной цифровой подписи. М.: Издательство стандартов, 2012.

4. ГОСТ Р 34.11-2012. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Функция хэширования. - М.: Издательство стандартов, 2012.

5. Mayer, H., & Paola. ECDSA Security in Bitcoin and Ethereum: a Research Survey. - 2016. [Электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/341977650_ECDSA_Security_in_Bitcoin_and_Ethereum_a_Research_Survey (дата обращения: 03.10.2024).

6. Qin X., Cai C., Yuen T.H. One-More Unforgeability of Blind ECDSA. In: Bertino, E., Shulman, H., & Waidner, M. (eds) Computer Security – ESORICS 2021. ESORICS 2021. Lecture Notes in Computer Science, vol 12973. Cham: Springer, 2021. С. 1-10.

7. СТБ 34.101.45-2013. Информационные технологии и безопасность. Алгоритмы электронной цифровой подписи и транспорта ключа на основе эллиптических кривых. Минск: Белорусский государственный стандарт, 2013.

8. Колесников П. В., Антихович М. В., Малец В. С. Схема Шнорра в криптографии. // Компьютерные системы и сети: сборник статей 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов. Минск, 2023. С. 393–396.

9. Schnorr C.P. Efficient Signature Generation by Smart Cards. J. Cryptology, 1991, 4 (3). P. 161–174.

Павлова Виктория Сергеевна студент, pawlova12@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Руководитель: Борзенкова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, tehnol@rambler.ru, Россия, Тула, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INVESTIGATION OF ALGORITHMS FOR GENERATION AND VERIFICATION OF ELECTRONIC SIGNATURE BASED ON ELLIPTIC CURVES

V.S. Pavlova

Algorithms for generation and verification of an electronic signature based on GOST 34.10-2018, ECDSA (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm) and STB 34.101.45-2013 are considered in the paper and the results of research on the applicability of algorithms in various implementation conditions are presented. The study was conducted using software implementation of algorithms in the Python programming language. The results of the study can be applied to various objects to be protected.

Key words: electronic signature, elliptic curves, Schnorr scheme, GOST 34.10-2018, ECDSA, STB 34.101.45-2013.

Pavlova Victoria Sergeevna, student, pawlova12@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Supervisor: Borzenkova Svetlana Yuryevna, candidate of technical sciences, docent, tehnol@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 721.001
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-326-327

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ ОБЪЕКТА В РАМКАХ РЕНОВАЦИИ

Т.Х. Бидов, А.О. Хубаев, А.Г. Гаврилова, С.Д. Черноглазов

В условиях постоянного роста городов реновация городских территорий является неотъемлемой частью современного градостроительства, представляя собой комплексный и многоаспектный процесс, охватывающий различные сферы городской жизни. Она направлена на повышение комфорта и улучшение условий жизни населения путем системного и планомерного преобразования городской среды. Реновация предполагает широкий спектр мероприятий, включающий в себя модернизацию и реконструкцию городских инфраструктур, от дорожно-транспортной сети до инженерных систем жизнеобеспечения. Наряду с этим, особое внимание уделяется улучшению качества жилых и общественных пространств, что подразумевает не только реконструкцию существующих зданий, но и создание новых, комфортабельных и эстетически привлекательных объектов. Целью статьи является разработка методики оценки влияния на окружающую застройку объекта в рамках реновации с определением основных этапов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью систематического подхода к реновации, особенно в контексте потенциальных рисков для окружающей среды и инфраструктуры. Недостаточная проработка вопроса оценки зоны влияния и отсутствие единой системы для принятия организационно-технических решений при реновации могут привести к негативным последствиям, таким как повреждения зданий и ухудшение условий проживания.

Ключевые слова: организационно-технологические решения, реновация городских территорий, зона влияния нового строительства на окружающую застройку, расчет зоны влияния нового строительства, оценка технического состояния.

Реновация городских территорий является неотъемлемой частью современного градостроительства, направленного на повышение комфорта и улучшение условий жизни населения. Она предполагает модернизацию и реконструкцию городских инфраструктур, улучшение качества жилых и общественных пространств, а также сохранение и восстановление культурного наследия города. [1-4]

Одним из ключевых аспектов реновации городских территорий является создание комфортных и функциональных общественных пространств, которые способствуют социальному взаимодействию и развитию местной экономики. Это может включать в себя строительство новых объектов, создание новых парков, скверов, пешеходных зон. Реновация городских территорий направлена на улучшение качества жилых пространств, в том числе благоустройство жилых кварталов, модернизация жилых зданий, улучшение санитарно-гигиенических условий. [5-7] Реновация городских территорий представляет собой многоэтапный процесс, реализуемый в рамках последовательно сменяющихся друг друга этапов (рисунок 1).

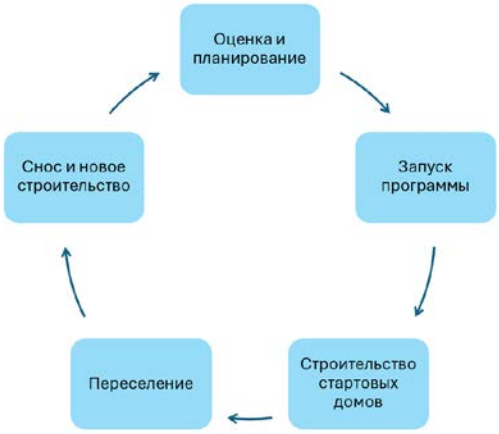


Рис. 1. Основные этапы реновации городских застроек

Недостаточно проработанная организация строительства новых объектов может привести к ряду негативных последствий для существующей застройки, таким как: появление трещин в стенах соседних домов из-за вибраций от тяжелой техники, просадка грунта, ведущая к деформации фундаментов, а также постоянный шум и пыль, значительно ухудшающие условия проживания в районе.[8-12] В связи с этим сегодня научным сообществом уделяется особое вниманием, связанным с организацией и проведением работ по реновации. В настоящее время особенно остро чувствуется недостаток единой системы для принятия организационно-технических решений в рамках реновации, что требует разработки концепции, обеспечивающей строгие и единые стандарты нормативно-методического регулирования. Такая концепция должна позволять научно обоснованно, оперативно и точно решать весь спектр вопросов, связанных с оценкой ресурсной базы для реновации. [13]

Отдельное внимание уделяется формированию эффективных комплектов машин для производства земляных работ, что обусловлено отсутствием систематизации строительных площадок и их ключевых характеристик. Поэтому ведутся исследования, направленные на анализ различных типов строительных площадок, чтобы определить оптимальные решения для каждой из них. [14-15] Рассматриваются вопросы градостроительного потенциала жилого квартала, в том числе проблема трансформации его ландшафта с учетом условий взаимовлияния массовой реновации и градостроительно-инвестиционного потенциала. [16]

Практика показывает [17-23], что недостаточно изучается вопрос оценки зоны влияния, который является одним из важнейших этапов при реализации жизненного цикла работ по реновации, поэтому особое значение приобретает методика оценки воздействия на окружающую застройку. Она закладывает основу для эффективного планирования и принятия решений, направленных на минимизацию негативных последствий для качества жизни в прилегающих районах. [24-26]

Под зоной влияния нового строительства понимается территория вокруг объекта строительства, на которой могут наблюдаться негативные последствия от его возведения или изменения (рисунок 2). Граница этой зоны определяется расстоянием, за пределами которого негативное воздействие на окружающую застройку пренебрежимо мало. [27]

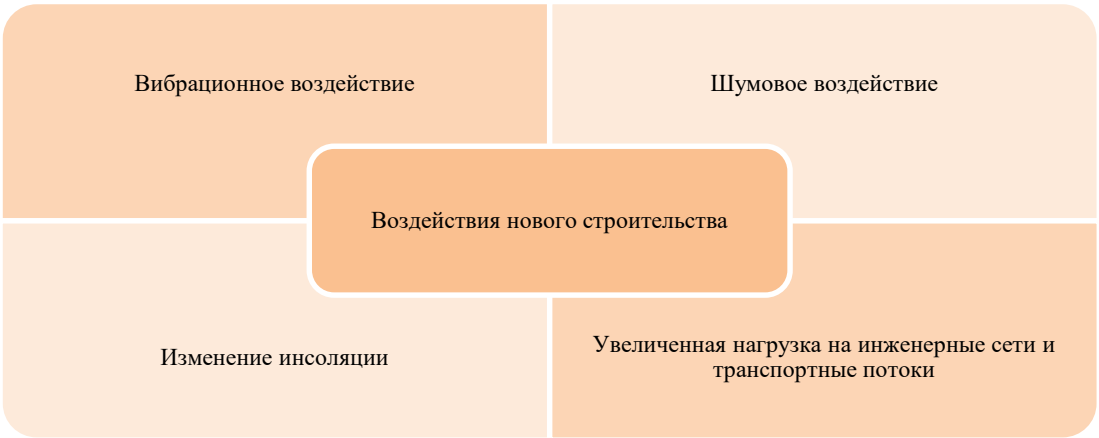


Рис. 2. Виды негативного воздействия нового строительства на существующую застройку

Для определения зоны влияния нового строительства на окружающую застройку проводят геотехнические расчёты. Выделяют две зоны влияния строительства: предварительную и расчётную. [28-30]

Предварительная зона влияния используется для определения воздействия нового строительства на окружающую застройку. Все здания, сооружения и коммуникации, попадающие в предварительную зону влияния, подлежат обследованию и включаются в расчётную модель геотехнического прогноза.

Расчётная зона влияния представляет собой математическую модель, в которую входят котлован, проектируемое здание, нагрузки от этого здания и параметры существующей застройки в зоне влияния. Моделируется ситуация стройки, то есть все этапы строительства.

Расчет зоны воздействия и прогнозирование возможных рисков помогают избежать нежелательных последствий и обеспечить гармоничное развитие городской среды.[31]

Специалистам ФГБОУ ВО Национального исследовательского Московского государственного строительного университета по Техническому заданию была поставлена задача по обследованию окружающей застройки и оценке влияния от нового строительства.

На основании систематизации методологии было принято решение разделить процесс оценки воздействия нового строительства на окружающую застройку на 4 этапа. (рисунок 3).



Рис. 3. Этапы оценки влияния объекта на окружающую застройку и их составляющие

В процессе оценки важно учитывать, что каждый проект реновации или нового строительства уникален, и его реализация может столкнуться с определенными трудностями. [32] В зависимости от характеристик участка, плотности застройки, существующих инженерных сетей, а также уровня развития городской инфраструктуры, влияние нового строительства на окружающую среду может проявляться по-разному. На каждом этапе оценки возникают свои специфические сложности, которые требуют тщательного анализа и поиска оптимальных решений. [33-35]

В рамках проведения данной работы было принято решение сформировать дорожную карту, разбив каждый этап на элементы и его составляющие.

Этап 1. Подготовительный период включает в себя сбор и анализ данных о проектируемом объекте, состоянии окружающей застройки, инженерных коммуникациях, экологической обстановке и социально-экономическом контексте. На этом этапе требуется изучение проектной документации для понимания масштаба и характеристик объекта, оценка физического и исторического состояния соседних зданий, анализ инфраструктуры, включая водоснабжение, электричество и канализацию, а также экологической и социальной среды.

Однако, этот этап сопряжен с рядом трудностей. Во-первых, может возникнуть проблема с недостаточностью или недоступностью данных, особенно для старых или частных объектов, где информация может быть неполной или устаревшей. Во-вторых, проектные данные могут изменяться в процессе разработки, что требует постоянного обновления информации и может затруднять точный прогноз воздействия. В-третьих, сложности в прогнозировании воздействия на инженерные системы и экологию из-за множества переменных, включая износ существующих сетей и непредсказуемость экологических изменений.

Этап 2. Обследование является важным этапом оценки состояния окружающей застройки и инженерных коммуникаций, которое включает в себя два основных вида: визуальное и инструментальное.

Визуальное обследование предполагает осмотр объектов и инфраструктуры для выявления видимых дефектов и повреждений, что позволяет получить общее представление о состоянии объектов и выявить потенциальные проблемы. Для более детального изучения состояния объектов и инфраструктуры проводится инструментальное обследование с использованием специального оборудования, что позволяет получить более точные данные и выявить скрытые дефекты.

Поскольку оба вида обследования необходимы для получения полной картины состояния окружающей застройки и инженерных коммуникаций, важно учитывать возможные сложности, которые могут возникнуть на этом этапе, такие как ограниченный доступ к объектам, сложность интерпретации результатов, необходимость специального оборудования и квалифицированных специалистов, а также отсутствие документации и сложность инфраструктуры.

Этап 3. Расчет оценки воздействия нового строительства на окружающую застройку включает в себя комплексный анализ потенциальных последствий для соседних зданий, инфраструктуры и окружающей среды. Этот расчет предполагает оценку влияния нового строительства на устойчивость соседних зданий, уровень шума, вибраций, загрязнения воздуха и воды, а также других факторов. Среди проблем, с которыми можно столкнуться, выделяются: неполнота или недоступность данных, сложности в прогнозировании долгосрочных эффектов, а также возможные конфликты интересов между застройщиками и местным сообществом.

Этап 4. Прохождение экспертизы включает в себя проверку и оценку документации на соответствие требованиям и нормам, установленным законодательством и регулирующими органами. Данный процесс осуществляется квалифицированными экспертами в соответствующих областях. Следует отметить, что этап экспертизы может быть осложнен рядом факторов, таких как: недостаточность или неполнота представленной документации, несоответствие проекта нормативно-правовым актам, возникновение дискуссионных вопросов между экспертной комиссией и разработчиками проекта, а также пролонгация сроков рассмотрения. Вышеуказанные факторы могут обусловить отрицательное заключение экспертизы, необходимость доработки и корректировки проектной документации, увеличение временных и финансовых затрат на реализацию проекта, негативное влияние на репутацию застройщика и снижение уровня доверия со стороны инвесторов и потенциальных клиентов.

Подводя итоги, можно констатировать, что реновация, являясь необходимым инструментом современного градостроительства, сопряжена с рядом сложностей, требующих системного решения. Недостаточная проработка вопроса оценки зоны влияния нового строительства и отсутствие единой методологии оценки воздействия на окружающую застройку являются существенными препятствиями на пути к эффективной реновации.

Представленная в статье поэтапная модель оценки наглядно демонстрирует комплексный подход к решению данной проблемы. Разработка единых стандартов, создание эффективных инструментов прогнозирования и формирование научно-обоснованной базы для принятия организационно-технических решений в рамках реновации станут залогом минимизации негативных последствий и обеспечат гармоничное развитие городской среды.

Список литературы

1. Карпушко Е.Н. Реновация как стадия жизненного цикла объекта недвижимости / Е. Н. Карпушко, В. Н. Фазлиахметова, Е. А. Стрельникова // Экономика строительства. 2017. № 3(45). С. 57-67. EDN YNGINP.

2. Особенности разработки проекта организации строительства для объектов жилого назначения в рамках программы реновации / Т. Х. Бидов, Р. С. Фатуллаев, А. О. Хубаев [и др.] // Строительное производство. 2022. № 4. – С. 100-105. – DOI 10.54950/26585340_2022_4_100. – EDN OVKEKE.

3. Анализ основных проблем планирования программ капитального ремонта / А. Ю. Кагазежев, Р. С. Фатуллаев, А. О. Хубаев, Я. В. Шестерикова // Перспективы науки. – 2022. – № 12(159). – С. 81-86. – EDN WWCYKN.

4. Kuzmina, T. K. Forming the complex quality indicator of social objects / T. K. Kuzmina, Ya. V. Shesterikova, D. M. Nikolenko // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering” (ERSME-2023), Rostov-on-Don, Russia, 01–03 марта 2023 года. Vol. 376. – Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2023. – P. 05056. – DOI 10.1051/e3sconf/202337605056. – EDN WCCKHF.

5. Хаметов, Т. И. Совершенствование управления городскими территориями жилой застройки в период реновации / Т. И. Хаметов, Н. О. Рожнов // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2023. – № 1(44). – С. 116-123. – EDN BPNHEC.

6. Дементьева, А. В. Технико-экономические критерии оценки качества городской среды при реновации жилой застройки / А. В. Дементьева, В. Ю. Доможилов // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2017. – № 5(23). – С. 22-26. – EDN ZHNFFJ.

7. Лапидус, А. А. Исследование организационно-технических решений при проведении капитального ремонта многоквартирных жилых домов / А. А. Лапидус, Т. Х. Бидов, А. О. Хубаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 172-176. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-172-173. – EDN UBHFXR. 15

8. Оценка влияния комплексного обследования технического состояния здания на примере объекта культурного наследия / Д. Д. Ельникова, Я. В. Шестерикова, Т. Х. Бидов, Р. С. Фатуллаев // Components of Scientific and Technological Progress. 2023. № 6(84). С. 14-18. EDN GWGKLN.

9. Организационно-технологические решения, влияющие на результативность возведения монолитных конструкций при организации строительства жилых зданий и сооружений / Т. Х. Бидов, М. А. Котляров, Г. Г. Ах-

вердашвили [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 6. С. 175-182. EDN LETPIH.

10. Хубаев А.О. Анализ и сбор данных для проведения капитального ремонта в России / А. О. Хубаев, Б. Р. Долов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 625-628. DOI 10.24412/2071-6168-2023-7-625-626. EDN MITUBH.

11. Фатуллаев Р.С. Оценка параметрической базы организационно-технологического моделирования объекта, в котором планируется проведение внепланового капитального ремонта / Р. С. Фатуллаев, А. А. Лапидус // Наука и бизнес: пути развития. 2017. № 8(74). С. 28-34. EDN ZLYLBH.

12. Организационно-технологическое моделирование комплексной оценки потенциала проведения внеплановых ремонтных работ / А. А. Лапидус, Д. В. Топчий, Р. С. Фатуллаев [и др.]. Москва : Издательство АСВ, 2023. 89 с. EDN EHCBCN.

13. Журавлев П.А. Система нормативно-методического обеспечения принятия организационно-технологических решений при реконструкции и реновации зданий и сооружений: специальность 05.02.22 "Организация производства (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Журавлев Павел Анатольевич, 2015. 224 с. EDN UHTWWH.

14. Олейник П.П. Система ограничений комплекта машин для земляных работ в условиях реновации городской застройки / П. П. Олейник, В. В. Ефимов // Строительное производство. 2020. № 4. С. 58-62. DOI 10.54950/26585340_2020_4_58. EDN XDHOUG.

15. Ефимов В.В. Выявление значимости параметров необходимых для выбора оптимального комплекта машин для производства земляных работ в условиях городской застройки // Инженерный вестник Дона. 2021. № 7(79). С. 320-328. EDN XFNSHV.

16. Алексеев Ю.В. Влияние условий массовой реновации 5-ти этажной застройки и ее градостроительно-инвестиционного потенциала на трансформацию сложившегося ландшафта жилого квартала / Ю. В. Алексеев, А. А. Ануфриев // Архитектура и строительство России. 2018. № 1(225). С. 94-101. EDN LBKFIT.

17. Анализ стоимости выполненных работ по капитальному ремонту общего имущества в многоквартирных жилых домах в субъектах Российской Федерации / А. А. Лапидус, Р. С. Фатуллаев, Т. Х. Бидов, Д. М. Николенко // Строительное производство. 2023. № 2. С. 3-7. DOI 10.54950/26585340202323. EDN JMWMYC.

18. Кагазежев А.Ю. Анализ основных проблем инженерно-технического обследования многоквартирных жилых домов / А. Ю. Кагазежев, З. Х. Чипова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 3. С. 323-325. DOI 10.24412/2071-6168-2023-3-323-325. EDN CHTACA.

19. Концепция формирования системы безопасности производства работ при организации строительства гражданских зданий из монолитного железобетона на основе системы искусственного интеллекта / А. А. Лапидус, А. О. Хубаев, Т. Х. Бидов, Д. В. Топчий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 605-609. DOI 10.24412/2071-6168-2024-8-605-606. EDN UUPQYF.

20. Хубаев А.О. Сравнительный анализ применения современных автоматизированных систем «Умные технологии»: возможности, перспективы / А. О. Хубаев, В. А. Власенко, Н. В. Макаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 571-576. DOI 10.24412/2071-6168-2024-8-571-572. EDN KZPLZS.

21. Комплексное обследование объекта социального назначения для разработки проекта усиления конструкций здания / Т. Х. Бидов, А. О. Хубаев, Р. С. Фатуллаев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 12. С. 385-390. DOI 10.24412/2071-6168-2022-12-385-391. EDN LAMXSL.

22. Кагазежев А.Ю. Программа формирования методики определения межремонтных сроков многоквартирных домов / А. Ю. Кагазежев, Р. С. Фатуллаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 34-39. DOI 10.24412/2071-6168-2024-1-34-35. EDN NSZIUL.

23. Кагазежев А. Ю. Анализ существующих подходов к определению межремонтных сроков МКД в регионах РФ / А. Ю. Кагазежев, Р. С. Фатуллаев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 97-99. DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-97-98. EDN RXBLPP.

24. Бидов Т.Х. Формирование производственно-технологических модулей / Т. Х. Бидов, Р. Т. Аветисян // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 12. С. 496-498. EDN RTSVVU.

25. Основы технологического моделирования в строительстве / Д. А. Погодин, А. В. Ищенко, Т. Х. Бидов [и др.]. Москва: Издательство АСВ, 2022. 134 с. EDN RRJBYT.

26. Лапидус А.А. Формирование производственно-технологических модулей, обосновывающих использование методов неразрушающего контроля при возведении монолитных конструкций гражданских зданий / А. А. Лапидус, Т. Х. Бидов // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 1(91). С. 36-39. EDN ZDOIOT.

27. Lapidus A. Organizational and technological solutions justifying use of non-destructive methods of control when building monolithic constructions of civil buildings and structures / A. Lapidus, A. Khubaev, T. Bidov // MATEC Web of Conferences. Vol. 251. Moscow: EDP Sciences, 2018. P. 05014. DOI 10.1051/matecconf/201825105014.

28. Кузнецов И.А. Зона влияния объектов нового строительства на окружающую застройку в крупных городах // Строительство: Сборник статей магистрантов и аспирантов. В 2-х томах. Том 1. Выпуск 3. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. С. 34-40. EDN KZMMBK.

29. Оценка влияния нового строительства на существующую застройку / В. С. Долгопятова, В. А. Дремлюга, О. В. Минаева [и др.] // Проблемы науки. 2019. № 5(41). С. 36-39. EDN XJXVBW.

30. Далидовская А.А. Методы определения зоны влияния нового строительства // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 18-й Международной научно-технической конференции (73-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) [Электронный ресурс] / Белорусский национальный технический университет, Факультет транспортных коммуникаций ; редкол.: С. Н. Соболевская (гл. ред.), С. Е. Кравченко. Минск: БНТУ, 2020. С. 73-74.

31. Лапидус А.А. Формирование методологии детерминированной модели организации строительного производства на основе концепции организационно-технологической платформы строительства / А. А. Лапидус, Р. В. Мотылев, В. В. Сокольников // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18, № 1. С. 116-131. DOI 10.22227/1997-0935.2023.1.116-131. EDN IDDMFY.

32. Мотылев Р.В. Заключение о соответствии объекта строительства: алгоритм получения, проблемы и методы их решения / Р. В. Мотылев, Н. В. Розанцева // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2023. № 4. С. 17-28. EDN NIYVDK.

33. Мотылев Р.В. Проблематика календарного планирования при строительстве объектов с привлечением бюджетных средств / Р. В. Мотылев, А. С. Карпушкин // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 4(93). С. 73-81. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-4-73-81. EDN IRKEJG.

34. Кузьмина Т.К. Оценка факторов, влияющих на продолжительность выполнения работ по обследованию зданий и сооружений / Т. К. Кузьмина, Н. А. Берник, Д. А. Егоров // Строительное производство. 2024. № 2. С. 13-16. DOI 10.54950/26585340_2024_2_13. EDN WNMWJY.

35. Кузьмина Т.К. Оценка факторов, влияющих на продолжительность выполнения работ по обследованию зданий и сооружений / Т. К. Кузьмина, Н. А. Берник, Д. А. Егоров // Строительное производство. 2024. № 2. С. 13-16. DOI 10.54950/26585340_2024_2_13. EDN WNMWJY.

Бидов Тембот Хасанбиевич, канд. техн. наук, доцент, Директор Научно-образовательного центра «Конструкции, технологии и организация строительства», начальник лаборатории «Организационно-технологические системы использования искусственного интеллекта в строительстве» (ОТС), BidovTH@mgsu.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Хубаев Алан Олегович, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, KhubaevAO@mgsu.ru, Научно-образовательного центра "Конструкции, технологии и организация строительства", старший научный сотрудник Молодежной лаборатории «Организационно-технологические системы использования искусственного интеллекта в строительстве»; Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),

Гаврилова Анна Геннадьевна, лаборант Научно-образовательного центра "Конструкции, технологии и организация строительства", GavrilovaAG@mgsu.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Черноглазов Сергей Дмитриевич, аспирант, 7444079@gmail.com, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE IMPACT ON THE SURROUNDING DEVELOPMENT OF A FACILITY WITHIN THE FRAMEWORK OF RENOVATION

T.H. Bidov, A.O. Khubaev, A.G. Gavrilova, S.G. Chernoglazov

In the context of constant urban growth, urban renewal is an integral part of modern urban planning, representing a complex and multidimensional process covering various spheres of urban life. It is aimed at improving the comfort and living conditions of the population through systematic and systematic transformation of the urban environment. Renovation involves a wide range of activities, including modernization and reconstruction of urban infrastructures, from the road network to engineering life-support systems. Along with this, special attention is paid to improving the quality of residential and public spaces, which implies not only the reconstruction of existing buildings, but also the creation of new, comfortable and aesthetically attractive objects. The purpose of the article is to develop a methodology for assessing the impact on the surrounding development of the object within the framework of renovation with the definition of the main stages. The relevance of the study is due to the need for a systematic approach to renovation, especially in the context of potential risks to the environment and infrastructure. Insufficient elaboration of the impact zone assessment issue and the lack of a unified system for making organizational and technical decisions during renovation can lead to negative consequences, such as damage to buildings and deterioration of living conditions.

Key words: organizational and technological solutions, renovation of urban areas, zone of influence of new construction on the surrounding development, calculation of the zone of influence of new construction, assessment of technical condition.

Bidov Tembot Khasanbievich, candidate of technical sciences, docent, Director of the Scientific and Educational Center for Construction, Technologies and Organization of Construction, Head of the Laboratory of Organizational and Technological Systems for Using Artificial Intelligence in Construction (OTS), BidovTH@mgsu.ru. Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering,

Khubaev Alan Olegovich, candidate of technical sciences, docent, leading researcher of the scientific and educational Center for Construction, Technologies and Organization of Construction, Senior Researcher of the Laboratory of Organizational and Technological Systems for Using Artificial Intelligence in Construction (OTS), KhubaevAO@mgsu.ru, Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering,

Gavrilova Anna Gennadievna, laboratory assistant of the Scientific and Educational Center for Construction, Technologies and Organization of Construction, GavrilovaAG@mgsu.ru, Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering,

Chernoglazov Sergej Dmitrievich, postgraduate, 7444079@gmail.com, Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering

УДК 004.451.25
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-332-333

ОБЩИЕ ПОХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

А.Я. Моргунов, Е.В. Комаров, А.А. Бурлаков, А.И. Муравьев

В статье рассмотрены подходы к оценке эффективности волоконно-оптических систем передачи. Показано, что подход к решению этих задач основан на использовании методов, разработанных для электрических кабелей и линий связи на них, теории оптических волноводов и современных положений теории эффективности технических систем. Сделан вывод о необходимости разработки методики оценки волоконно-оптических систем.

Ключевые слова: оценка эффективности, эффективность функционирования.

В работе [1] рассматриваются общие походы к решению задач оценки эффективности оптического кабеля (ОК), которые учитывают особенности компонентов волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) и могут быть применены для оценки эффективности функционирования ВОСП. Подход к решению этих задач основан на использовании методов, разработанных для электрических кабелей и линий связи на них, теории оптических волноводов и современных положений теории эффективности технических систем.

Согласно этому подходу, под эффективностью системы действий, направленных на выработку технических требований к создаваемым системам или средствам, выбор рационального варианта проектируемой системы, выявление функциональных возможностей технических средств, понимается степень соответствия между ее реальным y и требуемым y_{mp} результатом. Мерой указанного соответствия является показатель эффективности

$$W(x)=\begin{cases}\rho[y(x),y_{mp}], & \text{если } y \text{ и } y_{mp} \text{ - случайные перемеенные}\\ M\{\rho\{\rho[y(x)_{mp}]\}\} & \text{- в противном случае,}\end{cases} \quad (1)$$

где x – решение, ρ – функция соответствия, $M\{.\}$ – оператор математического ожидания. В случае m-мерной задачи W – свертка частных показателей Wi $i=1, m$.

Этапы исследования эффективности операций, включают в себя: проблемный анализ

$$A\times\pi\rightarrow B; \quad (2)$$

концептуальное исследование

$$B\times\mu\times\nu\times\gamma\rightarrow N; \quad (3)$$

операциональное исследование

$$N\times D\rightarrow X^{*} \quad (4)$$

и принятие решения

$$X^{*}\times\sigma\rightarrow x^{*} \quad (5)$$

где A – множество альтернативных целей, достижение которых решает проблему (улучшение качества и снижение стоимости связи или передачи другой информации); π – ряд усложняющихся уровней качества; B – множество метасистемных описаний по затрагиваемым проблемой техническим отраслям (связь, кабельное производство, и т. д.); μ – уровни усложняющегося поведения исследуемой системы; ν – обоснование методологического уровня исследования эффективности операций: γ – обоснование концепции рационального поведения; N – множество вариантов внешнего дополнения к конкретным описаниям исследуемой системы (в т. ч. по системам строительства и эксплуатации оптической кабельной линии, защиты от внешних воздействий): D – множество вариантов исходных данных задачи выбора рационального решения (требуемые характеристики оптического кабеля и линии, стоимостные показатели, функциональная связь между технико-экономическими показателями для ВОСП различного назначения); X^{*} – множество рациональных решений; σ – множество возможных ситуаций к моменту принятия решения x^{*}.

Ввиду значительной степени неопределенности отображений (2), (3) исследование на соответствующих этапах затруднено и решение, как правило, ограничивается этапами (4), (5). На основании принятой концепции рационального поведения (пригодности, оптимизации или адаптации) выбирается вид показателя эффективности. В рамках концепции пригодности, в условиях определенности, когда событие A_0 выражается соотношением $y\geq y_{mp}$, показатель эффективности представляет собой булеву переменную:

$$W_{пр}(x)=\begin{cases}1 & при \quad y\geq y_{Tp};\\ 0 & при \quad y<y_{Tp}.\end{cases} \quad (6)$$

В условиях неопределенности (y, y_{mp} – случайные переменные) могут быть приняты показатели эффективности в виде вероятностной гарантии

$$W_{пр}(x)=1-F(y_{mp}) \quad (7)$$

и вероятностно-гарантированного результата

$$W_{пр}=F^{-1}(1-\alpha)=y_{mp}\,\big|\,P(y\geq y_{mp})=\alpha \quad (8)$$

где $F(y)$ – функция распределения случайной величины y, F^{-1} – квантиль распределения, α – степень гарантии.

Согласно концепции оптимизации

$$W^{*}(x)=\max\{W(x)\,\big|\,x\in X\}, \quad (9)$$

причем различаются критерии наибольшего и наибольшего среднего результатов, наибольших вероятности гарантии и гарантированного результата и другие.

Концепция адаптации предусматривает изменение стратегии x на основе добываемой информации. Данной концепции соответствует оптимизация ВОСП по качеству, в процессе которой улучшаются отдельные парамет-

ры системы или подсистемы по сравнению с исходными значениями, причем достижение экстремальных значений W^* не является обязательным. Такая оптимизация представляет собой итерационный процесс, с каждым шагом которого повышается эффективность и качество ВОСП и система приближается к своему оптимальному состоянию. ВОСП характеризуется рядом параметров: q_1, q_2,…,q_l. Упорядоченная совокупность этих параметров обусловливает возможность оценки качества функционирования ВОСП и может быть представлена l-мерным вектором

$$q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_l \end{pmatrix} \tag{10}$$

Аналогично (10) определяются векторы внешних условий функционирования s, неуправляемых факторов v и управляемых факторов x:

$$s = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{pmatrix}; v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_l \end{pmatrix}; x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}. \tag{11}$$

Совокупность всех векторов x образует множество возможных решений

$$X = \{x \mid x \in R^n\}, \tag{12}$$

где R^n – n-мерное евклидово пространство. На множестве X должно быть определено оптимальное решение. Таким же образом определяются множества

$$Q = \{q \mid q \in R^l\}, S = \{s \mid s \in R^k\}, V = \{v \mid v \in R^t\}, \tag{13}$$

причем $X \cup V = Q \cup S$.

При наличии как прямых, так и обратных показателей эффективности, уравнение оптимального решения (9) имеет более общий вид:

$$W^*(x) = extr\{W(x, v) \mid x \in X\}. \tag{14}$$

Множество решений

$$X = \bigtimes_{k=1}^{p} X_k, \quad \text{если } X_k = \{x_{ki} \mid i = \overline{1, p_k}\}, \tag{15}$$

причем X_k могут представлять собой континуумы (непрерывные параметры и характеристики ВОСП: коэффициенты затухания и широкополосности, и т. д.) или дискретные множества с конечным количеством элементов (дискретные параметры кабеля: число ОВ, число модулей и т.д.). При оптимизации отдельных параметров и характеристик ВОСП в первом случае определяются аргументы экстремумов функций непрерывных переменных, во втором – производится выбор компонентов

$$x_{ki} \mid i = \overline{1, p_k},$$

представляющих наилучшие решения. Множества X и X_k могут изменяться по мере развития технологии производства компонентов ВОСП и изменения условий их функционирования.

Таким образом, выполненный анализ показал, что в настоящее время отсутствует универсальная методика, позволяющая осуществить анализ эффективности функционирования систем информационного обмена по произвольным показателям в условиях совокупного воздействия внутренних и внешних, искусственных и естественных факторов от различных источников. Известные методики основываются, как правило, на совокупности частных моделей для оценки по показателям, характеризующим разведзащищенность, помехоустойчивость, живучесть и техническую надежность с последующим их объединением (определение обобщенного показателя) и использованием различных методов скаляризации [2]. При этом могут учитываться только отдельные факторы воздействия и не учитывается совокупное влияние различных дестабилизирующих воздействий и их источников. Оценка же преднамеренных воздействий осуществляется в предположении, что при отсутствии преднамеренных помех требования к качеству связи выполняется.

Особенностью рассмотренных методов является также то, что модель, как правило, строится для решения конкретной задачи, поскольку считается, что создание универсальных моделей не оправдывается ввиду их громоздкости и непригодности к практическому применению.

Неоправданным является отсутствие учёта естественных внешних воздействий, поскольку они могут оказать существенное влияние как на характер применения средств связи, так и на характер применения противоборствующей стороной средств подавления. Также возможность использования рассмотренных методов ограничивают специфические особенности ВОСП (сильная подверженность воздействию электрических разрядов молний, ионизирующих излучений, акустомеханических и других воздействий) которые могут привести к существенным погрешностям. Задача оценки эффективности ВОСП усложняется также из-за недостаточного исследования возможности и последствий применения как традиционных, так и нетрадиционных преднамеренных воздействий.

Таким образом, для решения общей задачи оценки разведзащищенности и пропускной способности ВОСП необходимо провести анализ совокупности дестабилизирующих факторов и разработать методику учёта их воздействия.

Список литературы

1. Шарангович С.Н. Многоволновые оптические системы передачи. СПб.: Лань, 2019. 120 с.
2. Соколов С.А. Волоконно-оптические линии связи и их защита от внешних влияний. СПб.: Инфра-Инженерия, 2019. 172 с.

Моргунов Алексей Яковлевич, канд. воен. наук, доцент, профессор, vchery@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи,

Комаров Евгений Владимирович, канд. воен. наук, доцент, komarovv53@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи,

Бурлаков Андрей Анатольевич, канд. воен. наук, доцент, burlakov38@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи,

Муравьев Александр Иванович, преподаватель, muravjev.a1@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи

GENERAL APPROACHES TO PERFORMANCE ASSESSMENT FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS

A.Ya. Morgunov, E.V. Komarov, A.A. Burlakov, A.I. Muravyev

The article discusses approaches to evaluating the effectiveness of fiber-optic transmission systems. It is shown that the approach to solving these problems is based on the use of methods developed for electric cables and communication lines on them, the theory of optical waveguides and modern provisions of the theory of efficiency of technical systems. It is concluded that it is necessary to develop a methodology for evaluating fiber-optic systems.
Key words: efficiency assessment, efficiency of functioning.

Morgunov Alexey Yakovlevich, candidate of military sciences, docent, professor, vchery@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications,

Komarov Evgeny Vladimrovich, candidate of military sciences, docent, komarovv53@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications,

Burlakov Andrey Anatolyevich, candidate of military sciences, docent, burlakov38@gmail.com, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications,

Muravyev Alexander Ivanovich, lecturer, muravjev.a1@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-334-335

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ НЕФТЕГАЗОВОГО СЕКТОРА

Д.А. Первухин, С.К. Нейрус, О.В. Афанасьева

В данной работе представлено исследование, направленное на использование имитационного моделирования в нефтегазовом секторе. В исследовании анализируется деятельность предприятия данной отрасли с целью создания имитационных моделей на основе реальных данных. Необходимо составить имитационную модель, которая будет описывать процесс бункеровки судов силами рассматриваемой компании. Результаты анализа используются для разработки методов, направленных на повышение эффективности деятельности компании нефтегазового сектора. В рассматриваемом проекте приводится имитационное моделирование в двух средах: GPSS World и Python. На обе программы был дан краткий обзор характеристик, их преимущества и недостатки, которые возникают при использовании того или иного обеспечения.
Ключевые слова: имитационное моделирование, системный анализ, логистика, бункеровка, GPSS World, Python.

1. **Введение.** Не секрет, что системный анализ применим в огромном количестве разнообразных сфер, в том числе, мы можем воспользоваться его методами и в организации деятельности компании, главная функция которого заключается в своевременной заправке судов. В данном проекте приведено имитационное моделирование в двух средах. Это необходимо для осознания возможностей используемых программ. Построение модели в двух средах стало крепким подспорьем для выработки рекомендаций по улучшению деятельности компании.

Процесс, который должен быть промоделирован, включает в себя несколько переменных, будь то ограничении в количестве каналов – количество бункеровщиков, которыми располагает компания, или же время обслуживания одной заявки. Стоит отметить тот факт, что общее время обслуживания одной заявки составляется из прямого взаимодействия с судном для заправки, а также времени, за которое бункеровщик должен добраться до судна [1, 2].

Имитационное моделирование стало необходимой частью исследования в наши дни, практически во всех сферах жизни применим этот метод. Использование имитационных моделей можно наблюдать в экономическом секторе, в повседневной жизни, в IT-секторе и промышленности. Каждый год появляются новые и совершенствуются старые методы, с помощью которых происходит имитационное моделирование.

Хоть GPSS был и остаётся довольно надёжным и качественным инструментом для проведения моделирования, необходимо обратиться к современным ПО. Именно при взаимодействии нескольких средств можно получить качественный результат исследования. Python сам по себе является отличным языком программирования, но с помощью нескольких популярных библиотек он становится мощной средой для имитационного моделирования. В данной работе была рассмотрена работа с библиотекой Simple. Это бесплатная система с открытым исходным кодом, написанная на Python, которая является очень качественным инструментом для моделирования систем.

2. **Основная часть.** GPSS World является надежным инструментом для моделирования различных систем, особенно в таких областях, как теория очередей и оптимизация промышленных процессов [3, 4]. Он позволяет пользователям заранее моделировать процессы, что дает им возможность вносить коррективы и сокращать неэффективность или потери, когда эти системы применяются на практике.

Ранее было проведено моделирование в этой среде. Вот основные условия поставленной задачи, отображённые в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные

T_w	λ	n, ед.	t_{proc}	Закон распределения
7	7	3	0,2 – 0,6	Равномерный

Как и было сказано ранее в данную СМО приходят заявки на бункеровку судов. Они генерируются по 7 единиц в сутки. Потом проводится обязательная проверка, есть ли незанятое устройство, которое будет обрабатывать заявку, то есть это свободное бункеровочное судно [5, 6]. Если так получится, что все бункеровщики заняты, тогда заявка отправляется на выход из системы, в другом же случае заявка попадает на один из трех каналов обслуживания. В конце, после обработки на одном из этих трёх каналов, заявка идёт на выход. Ниже на рисунке 1 представлен листинг работы в GPSS World.

```
BUNK      STORAGE   3
          GENERATE  (EXPONENTIAL(1,0,1/7))
          GATE SNF  BUNK,VIHOD
          ENTER     BUNK
          ADVANCE   (UNIFORM(2,0.2,0.6))
          LEAVE     BUNK
          TERMINATE 0
VIHOD     TERMINATE 0
          GENERATE  7
          TERMINATE 1
```

Рис. 1. Тело программы в GPSS World

Отчёт после выполнения данного кода представлен на рисунке 2.

```
  START TIME          END TIME  BLOCKS  FACILITIES  STORAGES
       0.000             7.000     9        0          1


     NAME                       VALUE
BUNK                         10000.000
VIHOD                            7.000


 LABEL             LOC  BLOCK TYPE     ENTRY COUNT CURRENT COUNT RETRY
                   1    GENERATE            47              0       0
                   2    GATE                47              0       0
                   3    ENTER               31              0       0
                   4    ADVANCE             31              0       0
                   5    LEAVE               31              0       0
                   6    TERMINATE           31              0       0
VIHOD              7    TERMINATE           16              0       0
                   8    GENERATE             1              0       0
                   9    TERMINATE            1              0       0


STORAGE            CAP. REM. MIN. MAX.  ENTRIES AVL.  AVE.C. UTIL. RETRY DELAY
 BUNK               3    3   0     3       31   1    1.780  0.593    0    0


FEC XN   PRI         BDT      ASSEM  CURRENT  NEXT  PARAMETER    VALUE
    49    0          7.014     49      0       1
    50    0         14.000     50      0       8
```

Рис. 2. Отчёт в GPSS World

Таким образом можно увидеть, что работа в данной среде имеет большие преимущества в лёгкости использования, однако глубина и качества имитационного моделирования будет значительно лучше при работе в Python. На текущий момент продолжение работы в среде GPSS не представляется наиболее актуальным и приемлемым вариантом. С темпами технического прогресса появились новые программные решения, которые предлагают большую гибкость и расширенные возможности [7-9]. Хотя GPSS доказала свою эффективность, современное программ-

ное обеспечение, такое как Python, которое было использовано для этой работы, дает дополнительные преимущества. Python упрощает процесс моделирования и предлагает более продвинутые инструменты для визуализации и оптимизации сложных систем. Он также хорошо сочетается с другими цифровыми инструментами, что упрощает проведение более детального анализа, отвечающего требованиям современного бизнеса [10, 11].

В постоянно меняющемся мире важно внедрять технологии, которые не только отвечают текущим потребностям, но и способны адаптироваться к будущим вызовам. Хотя GPSS был отличным ресурсом, гибкость и расширенные возможности Python делают его более подходящим для работы со сложными современными проектами [12, 13].

3. **Имитационная модель в PYTHON.** Перейдём к практическому рассмотрению задачи непосредственно в Python [14-16]. Необходимо составить имитационную модель для компании, которая специализируется на поставке топлива судам в открытом море. Данный процесс заправки называется бункеровкой. На текущий момент времени компания располагает скромным флотом из трёх бункеровщиков, время бункеровки которых составляет в среднем от 5 до 14 часов. Стоит отметить, что в данное время было высчитано экспериментальным путём на основе наблюдений компании. Оно складывается из нескольких параметров, в том числе непосредственный процесс заправки топливом судна, время пути до клиента. За одни сутки в систему поступает заявки на бункеровку от 8 до 12 кораблей за одни лишь сутки.

Составим код имитационной модели, в которой будет симулироваться работа компании с учетом поступления заявок, времени обслуживания, числа бункеровщиков и отказов в случае занятости всех бункеровщиков [17-19]. Моделирование будем проводить на протяжении недели. Каждый шаг в коде подписан, за что отвечает и какую роль играет [20, 21].

Стоит отметить, что необходимо подключить библиотеку Simpy, которая служит для создания дискретных событийных симуляций в Python.

По завершению моделирования необходимо получить статистику: Общее время симуляции, сколько всего поступило заявок, сколько обработано заявок, скольким суднам было отказано в обслуживании. Также нужно знать среднее количество заявок на бункеровку за день, коэффициент загруженности бункеровочного флота и количество заявок, находящихся в процессе обслуживания на момент окончания моделирования.

NUM_BUNKER_SHIPS - количество бункеровщиков (ресурсов), которые могут одновременно обслуживать корабли. В нашем случае их 3.

NUM_DAYS - количество дней, в течение которых мы будем симулировать работу (7 дней).

HOURS_IN_DAY - количество часов в одном дне (24 часа).

MIN_REQUESTS_PER_DAY и MAX_REQUESTS_PER_DAY - минимальное и максимальное количество заявок на бункеровку, поступающих за один день.

MIN_SERVICE_TIME и MAX_SERVICE_TIME - минимальное и максимальное время обслуживания одного корабля.

SIM_TIME - общее время симуляции в часах (7 дней по 24 часа, итого 168 часов)

Переменные, которые используются для хранения статистических данных:

total_requests — общее количество поступивших заявок.

processed_requests — количество обработанных (успешно выполненных) заявок.

denied_requests — количество заявок, которым было отказано в обслуживании.

env - это объект окружения симуляции, который отслеживает время и управляет процессами.

name - имя корабля, который в данный момент обслуживается.

bunkers - ресурс, представляющий собой бункеровщики.

Функция random.uniform(MIN_SERVICE_TIME, MAX_SERVICE_TIME) была задействована, чтобы задать случайное время обслуживания корабля в пределах от 8 до 12 часов.

yield env.timeout(service_time) — это команда, которая "замораживает" процесс на время обслуживания. Симуляция продолжает работать, но данный процесс приостанавливается на service_time часов.

После окончания времени обслуживания процесс возобновляется, увеличивая счётчик processed_requests, и выводится сообщение о завершении обслуживания.

Полный код программы представлен ниже:

```
import simpy
import random
# Параметры симуляции
NUM_BUNKER_SHIPS = 4  # Количество бункеровщиков
NUM_DAYS = 7  # Количество дней симуляции
HOURS_IN_DAY = 24  # Количество часов в дне
MIN_REQUESTS_PER_DAY = 8  # Минимальное количество заявок в день
MAX_REQUESTS_PER_DAY = 12  # Максимальное количество заявок в день
MIN_SERVICE_TIME = 12  # Минимальное время обслуживания (часов)
MAX_SERVICE_TIME = 16  # Максимальное время обслуживания (часов)
SIM_TIME = NUM_DAYS * HOURS_IN_DAY  # Общее время симуляции
# Статистика
total_requests = 0
processed_requests = 0
denied_requests = 0
total_daily_requests = 0  # Переменная для подсчета заявок за каждый день
in_process_requests = 0  # Количество заявок, находящихся в процессе обслуживания
total_bunker_usage_time = 0  # Время использования бункеровщиков
bunker_usage_per_day = []  # Список для хранения ежедневного использования бункеровщиков
# Процесс бункеровки
def bunkering_process(env, name, bunkers):
    global processed_requests, in_process_requests, total_bunker_usage_time
```

```
            service_time = random.uniform(MIN_SERVICE_TIME, MAX_SERVICE_TIME)
            # Увеличиваем счётчик заявок в процессе
            in_process_requests += 1
            # Засекаем время начала использования бункеровщика
            start_time = env.now
            yield env.timeout(service_time)
            # Когда процесс завершён, уменьшаем счётчик
            in_process_requests -= 1
            processed_requests += 1
            # Добавляем время использования бункеровщика
            total_bunker_usage_time += (env.now - start_time)
        # Процесс поступления заявок на бункеровку
        def ship_request(env, bunkers, ship_id):
            global total_requests, denied_requests
            total_requests += 1
            if len(bunkers.queue) < NUM_BUNKER_SHIPS:
                with bunkers.request() as request:
                    yield request
                    yield env.process(bunkering_process(env, f"Корабль {ship_id}", bunkers))
            else:
                denied_requests += 1
        # Процесс симуляции поступления заявок
        def ship_arrival(env, bunkers):
            global total_daily_requests  # Чтобы обновлять статистику по заявкам за день
            ship_id = 1
            for day in range(NUM_DAYS):
                # Генерируем случайное количество заявок для текущего дня
                requests_today = random.randint(MIN_REQUESTS_PER_DAY, MAX_REQUESTS_PER_DAY)
                total_daily_requests += requests_today  # Добавляем к общему количеству заявок за все дни
                # Вычисляем интервал времени между заявками для текущего дня
                inter_arrival_time = HOURS_IN_DAY / requests_today
                for _ in range(requests_today):
                    yield env.timeout(inter_arrival_time)
                    env.process(ship_request(env, bunkers, ship_id))
                    ship_id += 1
                # Добавляем среднюю занятость бункеровщиков за день
                daily_bunker_usage = bunkers.count / NUM_BUNKER_SHIPS
                bunker_usage_per_day.append(daily_bunker_usage)
        # Основной код симуляции
        def run_simulation():
            global total_requests, processed_requests, denied_requests, total_daily_requests, in_process_requests, to-
tal_bunker_usage_time, bunker_usage_per_day
            # Создаем окружение симуляции
            env = simpy.Environment()
            # Создаем ресурс - бункеровщики
            bunkers = simpy.Resource(env, capacity=NUM_BUNKER_SHIPS)
            # Запускаем процесс поступления заявок
            env.process(ship_arrival(env, bunkers))
            # Запускаем симуляцию
            env.run(until=SIM_TIME)
            # Вычисляем среднее количество заявок в день
            avg_requests_per_day = total_daily_requests / NUM_DAYS
            # Рассчитываем среднее использование бункеровщиков в день
            avg_bunker_usage_per_day = sum(bunker_usage_per_day) / NUM_DAYS
            # Выводим результаты
            print("\nСтатистика симуляции")
            print()
            print(f"Общее время симуляции: {SIM_TIME} часов")
            print(f"Всего поступило заявок: {total_requests}")
            print(f"Всего обработано заявок: {processed_requests}")
            print(f"Всего отказано в обслуживании: {denied_requests}")
            print(f"Среднее количество заявок за день: {avg_requests_per_day:.2f}")
            print(f"Коэффициент загруженности бункеровочного флота: {avg_bunker_usage_per_day:.2f}")
            print(f"Количество заявок, находящихся в процессе обслуживания на конец симуляции:
{in_process_requests}")
        # Запуск симуляции
        if __name__ == "__main__":
            run_simulation()После запуска программы необходимо обратится к результатам моделирования, отоб-
ражённым на рисунке 3.
```

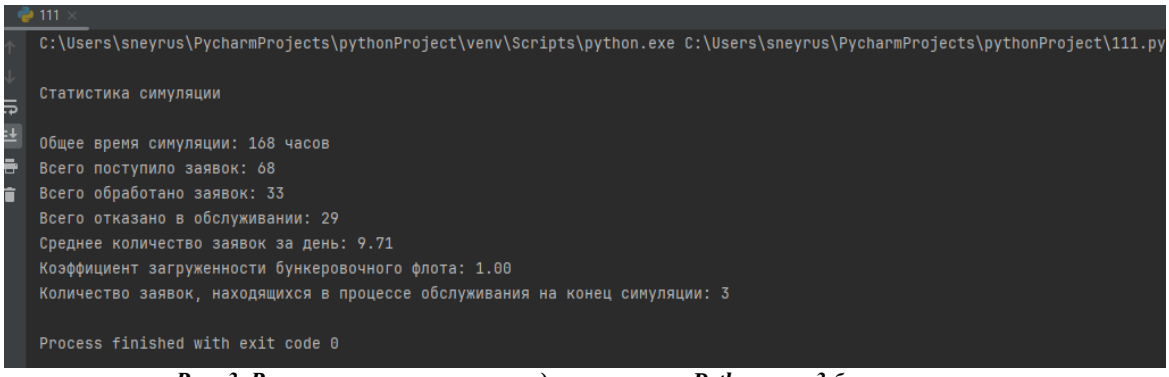


Рис. 3. Результат выполнения моделирования в Python при 3 бункеровщиках

Как видно из данного отчёта, хоть процент загруженности мощностей по бункеровке критично приблизился к максимальному значению, количество судов, которым было отказано в обслуживании достаточно велико. Данный факт напрямую влияет на прибыль компании. Исходя из этих данных, рекомендуется к приобретению ещё одно бункеровочное судно. Проведём же исследование при четырёх бункеровщиках и выведем отчёт (Рисунок 4).

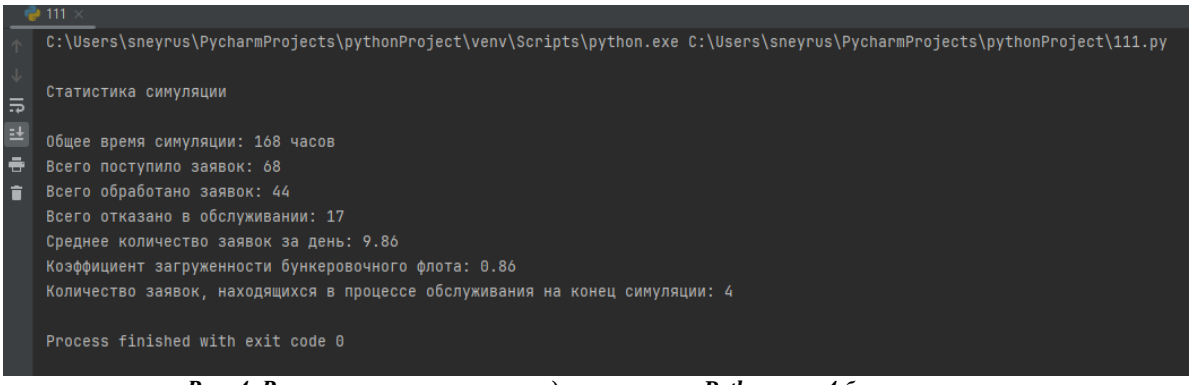


Рис. 4. Результат выполнения моделирования в Python при 4 бункеровщиках

Отчёт показывает, что за тот же промежуток времени, с одинаковым количеством заявок, процент загруженности снизился, количество потерянных клиентов значительно уменьшилось.

4. **Обсуждение результатов.** В данной работе была построена имитационная модель в двух средах. Сначала в GPSS World, это дало прочную основу для понимания построения процессов. Потом был задействован Python, с помощью его возможностей было проведено ещё одно моделирование [22-24]. Результаты, полученные в данном исследовании, вносят небольшой вклад в общую базу знаний, накопленную по данной теме, расширяют понимание возможности применения моделирования для конкретной рассматриваемой отрасли.

Рассмотрение тех или иных отделов помогает визуализировать реальную работу и функционирование отдела предприятия. Это поможет в дальнейшем сделать более глубокий анализ, рассмотреть сильные и слабые стороны отделов, что приведет к пониманию того, какие показатели и улучшения возможны для повышения производительности.

Актуальность данной работы заключается в разработке имитационной модели функционирования логистической компании нефтегазовой отрасли, занимающейся организацией бункеровки и работы с поступающими заявками. Также демонстрируется разработка новых методов, технологий и устройств на уровне изобретений и полезных моделей) эффективный подход к анализу работы предприятия, который базируется на различных имеющихся факторах и показателях. Такой подход к анализу основан исключительно на числовых показателях, что позволяет проводить его беспристрастно и повышает точность получаемых выводов [25, 26].

5. **Заключение.** Сочетание нескольких программ для осуществления имитационного моделирования позволяет удостовериться в качестве проводимого исследования. Python обладает широким спектром возможностей, которые отвечают современным требованиям.

Имитационное моделирование показало необходимость в приобретении ещё одного канала обслуживания, поскольку пропускная способность трёх не позволяет обслужить достаточное количество заявок. Именно поэтому покупка нового бункеровщика является необходимым шагом на пути к совершенствованию функционирования компании. При текущих данных, флот компании работает на износ, но даже при этом теряет большое количество заказов, а, следовательно, недополучает прибыль.

В ходе изучения работы профильными специалистами предприятия был сделан вывод о том, что представленный в работе материал непосредственно влияет на аспекты деятельности предприятия по рассматриваемому вопросу. Результаты носят прикладной характер и будут учтены в практической деятельности предприятия.

6. **Вклад авторов.** Первухин Д.А., д.т.н. – разработка методологии проведения исследования, разработка концептуальной модели исследования

Нейрус С.К., аспирант. – адаптация методов системного анализа для целей исследования, составление кода программы в GPSS World и Python

Афанасьева О.В., к.т.н. – отбор и корректировка используемых в работе методологий, составление кода программы в Python.

Список литературы

1. Fuentes G., Wallace S., Adland R. The effects of waiting times on the bunkering decision for tramp ships // Maritime Transport Research. 2024. Vol. 6. DOI: 10.1016/j.martra.2024.100106.
2. Liu B., Li Z.-C., Wang Y. A branch-and-price heuristic algorithm for the bunkering operation problem of a liquefied natural gas bunkering station in the inland waterways // Transportation Research Part B: Methodological. 2023. Vol. 167. P. 145–170. DOI: 10.1016/j.trb.2022.11.011.
3. Paredis R., Van Mierlo S., Vangheluwe H. Translating process interaction world view models to DEVS: GPSS to (Python (P)) DEVS // In 2020 Winter Simulation Conference (WSC). 2020. P. 2221–2232. DOI: 10.1109/WSC48552.2020.9383952.
4. Devyatkov V.V., Gabalin A.V. Investigation of Business Processes Involving Queues Using Simulation Modeling // In 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 2020. P. 217–220. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280672.
5. El Noshokaty, S. Shipping optimisation systems for liner: en-route bunkering, port late arrival, and tide restricted sailing // International Journal of Shipping and Transport Logistics. 2023. Vol. 16. P. 154. DOI: 10.1504/IJSTL.2023.128573.
6. Vlasiev, M.V., Demeshko, G.F. LNG bunkering tankers in marine ports: validation of demand in numbers // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 2. P. 89–98. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-89-98.
7. Watanabe E., Shibasaki R. Extraction of Bunkering Services from Automatic Identification System Data and Their International Comparisons // Sustainability. 2023. Vol. 15, № 24. P. 16711. DOI: 10.3390/su152416711.
8. Martirosyan A.V., Kukharova T.V., Fedorov M.S. Research of the hydrogeological objects' connection peculiarities // Proceedings of 2021 4th International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2021. 2021. P. 34–38. DOI: 10.1109/CTS53513.2021.9562910.
9. Рогулин Р.С., Рогулин Н.С., Говоров В.Р. Комплексная оптимизационная модель процессов складирования и транспортировки товаров лесной промышленности // Вестник Челябинского государственного университета. 2020. № 2 (436). С. 238–245. DOI: 10.24411/1994-2796-2020-10224.
10. Haque K., Homoud L., Zhuang X., Elnour M., Goulart A., Davis K. On Graph Theory vs. Time-Domain Discrete Event Simulation for Topology-Informed Assessment of Power Grid Cyber Risk // arXiv. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2409.04590.
11. Кузнецов И.С., Зиновьев В.В., Николаев П.И., Стародубов А.Н. Компьютерная система имитационного моделирования для оптимизации параметров экскаваторно-автомобильных комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 304–316. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_304.
12. Pershin I.M., Papush E.G., Kukharova T.V., Utkin V.A. Modeling of distributed control system for network of mineral water wells // Water. 2023. Vol. 15, № 12. P. 2289. DOI: 10.3390/w15122289.
13. Хомутов С.О., Сташко В.И., Серебряков Н.А. Повышение точности краткосрочного прогнозирования электропотребления групп точек поставки электроэнергии гарантирующих поставщиков второго уровня // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 6. С. 128–140. DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2682.
14. Omaran S.M., Al-Zuheriy A.S.J. Integrating Building Information Modeling and Virtual Reality to Develop Real-time Suitable Cost Estimates using Building Visualization // International Journal of Engineering. 2023. Vol. 36, № 5. P. 858–869. DOI: 10.5829/IJE.2023.36.05B.03.
15. Cherepovitsyn, A., Tsvetkova, A., Komendantova, N. Approaches to assessing the strategic sustainability of high-risk offshore oil and gas projects // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, № 12. P. 995. DOI: 10.3390/jmse8120995.
16. Karanjkar N., Joshi S. A Python-Based Mixed Discrete-Continuous Simulation Framework for Digital Twins // Advances in Simulation of Distributed and Networked Systems. 2023. P. 121–132. DOI: 10.1007/978-3-031-23149-0_11.
17. Badika E., Zyryanov D., Babchinetsky S. Using the python programming language in simulation modeling // Chronos. 2022. Vol. 7. P. 18–23. DOI: 10.52013/2658-7556-68-6-7.
18. Souza P., Ferreto T., Calheiros, R. EdgeSimPy: Python-based modeling and simulation of edge computing resource management policies // Future Generation Computer Systems. 2023. Vol. 148. DOI: 10.1016/j.future.2023.06.013.
19. Фунг В.К., Богатырев В.А., Кармановский Н.С., Лэ В.Х. Оценка вероятностно-временных характеристик компьютерной системы с контейнерной виртуализацией // Журнал. 2024. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-249-255.
20. Вакушин, А. А., Клебанов, Б. И. Применение больших языковых моделей в имитационном моделировании // Инженерный вестник Дона. 2024. № 2 (110). С. 52.
21. Pinho T.M., Coelho J., Cunha J. Forest-based supply chain modelling using the SimPy simulation framework // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49. P. 90–95. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.03.016.
22. Ilyushin Y.V., Kapostey E.I. Developing a comprehensive mathematical model for aluminium production in a soderberg electrolyser // Energies. 2023. Vol. 16, № 17. P. 6313. DOI: 10.3390/en16176313.
23. Тарасов В.Н., Бахарева Н.Ф. Управление характеристиками системы массового обслуживания через сдвиг законов распределений // Информационно-управляющие системы. 2023. № 5 (126). С. 55–63. DOI: 10.31799/1684-8853-2023-5-55-63.
24. Vasileva M.A., Feit S. Multiphysical model of heterogenous flow moving along a channel of variable cross-section // Journal of Mining Institute. 2017. Vol. 227. P. 558. DOI: 10.25515/pmi.2017.5.558.
25. Eremeeva A.M., Ilyushin Y.V. Automation of the control system for drying grain crops of the technological process for obtaining biodiesel fuels // Scientific Reports. 2023. Vol. 13, № 1. P. 14956. DOI: 10.1038/s41598-023-41962-0.
26. Razmanova S.V., Andrukhova O.V. Oilfield service companies as part of economy digitalization: assessment of the prospects for innovative development // Journal of Mining Institute. 2020. Vol. 244. P. 482–492. DOI: 10.31897/pmi.2020.4.11.

Первухин Дмитрий Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, pervukhin_da@pers.spmi.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, https://orcid.org/0000-0003-3547-2932,

Нейрус Семен Константинович, аспирант, samneyrus3@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, https://orcid.org/0000-0001-7530-1332

Афанасьева Ольга Владимировна, канд. техн. наук, доцент, ovaf72@guap.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, https://orcid.org/0000-0003-3169-4781

APPLICATION OF SIMULATION MODELING IN THE ENTERPRISE OIL AND GAS SECTOR

D.A. Pervukhin, S.K. Neyrus, O.V. Afanasyeva

This paper presents a study aimed at using simulation modeling in the oil and gas sector. The study analyzes the activities of the company in this industry in order to create simulation models based on real data. It is necessary to make a simulation model that will describe the process of ship bunkering by the company under consideration. The results of the analysis are used to develop methods aimed at improving the efficiency of the oil and gas sector company. In the project under consideration, simulation modeling in two environments: GPSS World and Python. Both programs were given a brief overview of their characteristics, their advantages and disadvantages that arise when using one or the other software.

Key words: simulation modeling, system analysis, logistics, bunkering, GPSS World, Python.

Pervukhin Dmitry Anatolyevich, doctor of technical sciences, professor, pervukhin_da@pers.spmi.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, https://orcid.org/0000-0003-3547-2932,

Neurus Semyon Konstantinovich, postgraduate, samneyrus3@gmail.com, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, https://orcid.org/0000-0001-7530-1332,

Afanasyeva Olga Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, ovaf72@guap.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, https://orcid.org/0000-0003-3169-4781

УДК 624.046.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-340-341

МЕТОД ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

С.Ш. Саая, К.В. Кенден

Приведено описание метода определения коэффициента запаса несущей способности деталей машин при расчете их по предельным состояниям. Целью данного исследования является обоснование оптимальных параметров несущей конструкции деталей машины. Предметом исследования является теория прочности несущей конструкции деталей машин. Дана схема реализации метода, позволяющая автоматизировать расчеты.

Ключевые слова: конструкции, нагрузки, напряжения, оценка, метод, запас прочности.

Введение. Числовой характеристикой способности конструкции выдерживать воздействие силовых нагрузок без разрушения является коэффициент запаса несущей способности. При постоянных прочностных характеристиках материала конструкции коэффициент запаса несущей способности зависит от характеристики воздействия [1, 2]

Совокупное воздействие нагрузок, произвольно ориентированных в пространстве, при расчетах эпюр напряжений сводится к системе трех проекций на оси координат равнодействующего вектора сил (P_x, P_y, P_z) и трех моментов (M_x, M_y, M_z) относительно осей координат (рисунок 1).

P_x — вызывает напряжения сжатия-растяжения $\sigma_1 = \pm \frac{P_x}{F_0}$;

P_y— вызывает напряжения сдвига $\tau_1 = \frac{P_y \cdot S_2^0 \cdot y}{l_z \cdot b_y}$;

P_z— вызывает напряжения сдвига $\tau_2 = \frac{P_z \cdot S_y^0 \cdot z}{ly \cdot b_z}$;

M_x — вызывает напряжения кручения $\tau_3 = \frac{M_x}{W}$;

M_y— вызывает напряжения изгиба $\sigma_2 = \frac{M_y \cdot Z}{l_y}$;

M_z —вызывает напряжения изгиба $\sigma_3 = \frac{M_y \cdot y}{l_z}$;

В точках сечения напряжения могут суммироваться и могут взаимопогашаться [3].

Объекты и методы исследования

При одновременном действии нормальных и касательных напряжений, в случае расчета по допускаемым напряжениям, напряженное состояние конструкции оценивается по эквивалентным напряжениям, вычисленным на основе теории прочности. Критерием опасного состояния в этом случае является равенство эквивалентных напряжений допускаемым.

Аппарата, аналогичного аппарату теорий прочности, в расчетах по несущей способности нет. Одновременное действие напряжений по всем граням элемента материала детали может приводить к снижению несущей способности — вследствие увеличения удельной энергии деформации, но может приводить и к повышению ее — вследствие упрочнения материала при объёмном нагружении.

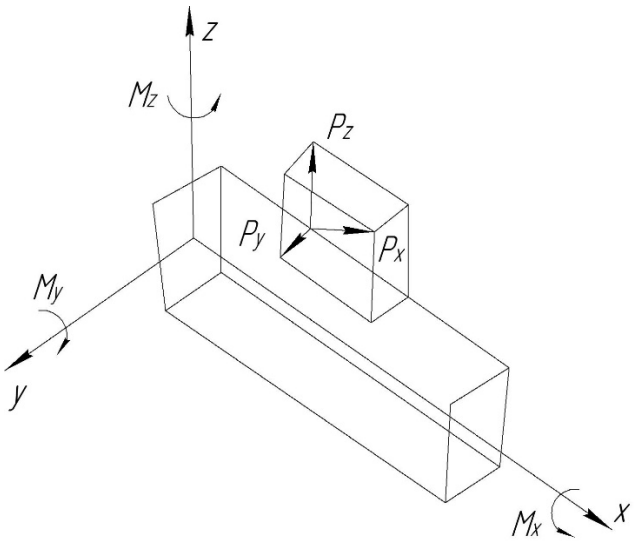


Рис. 1. Схема силового воздействия

Предельным состоянием конструкции при расчетах по несущей способности является момент образования пластического шарнира — момент достижения напряжений по всей площади сечения детали предела текучести [4, 5].

Предлагаемый метод оценки несущей способности базируется на анализе условий образования пластического шарнира и вида эпюр напряжений при сложном напряженном состоянии. На рисунке 2 приведены эпюры нормальных напряжений при косом изгибе с продольным сжатием. По эпюрам видно, что нулевая линия n—n (линия нейтрального слоя) смещена от центра и делит его на неравновеликие части. Смещение пропорционально осевой силе, а абсолютная величина его зависит от соотношения продольной сжимающей и изгибающих сил. Угол поворота нулевой линии, равно как и углы наклона плоскости эпюры к координатным осям, зависят от соотношения между изгибающими моментами, действующими в главных продольных плоскостях симметрии. Смещение и угол поворота нулевой линии в сочетании с углами наклона плоскости однозначно определяют вид эпюры [6, 7].

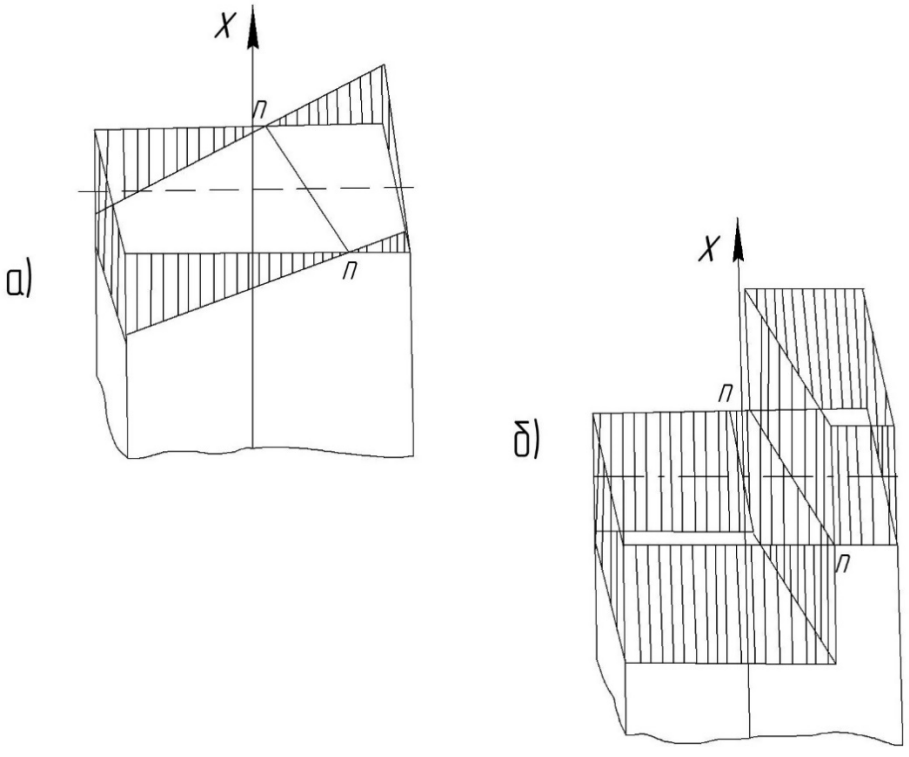


Рис. 2. Эпюры нормальных напряжений при косом изгибе с продольным сжатием: а – неполное нагружение; б – полное нагружение (пластический шарнир)

Следовательно, вид эпюры зависит от соотношения между составляющими воздействия. Из принципа независимости действия сил следует утверждение: предельно состояние считается достигнутым, если одно из напряжений, либо σ, либо τ достигало предела текучести по всей площади сечения детали [8].

Из такого анализа следует три вывода, положенных в основу предлагаемого метода оценки несущей способности:

1. Предельные прочностные возможности детали зависят не только от свойств материала, но и от характеристик напряженного состояния — вида эпюры напряжений.
2. Вид эпюры напряжений (при неизменной геометрии сечения) определяется соотношениями между составляющими нагрузки P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z.
3. Предельное состояние считается достигнутым, если одно из напряжений достигало предела текучести на всей площади сечения.

Результаты исследования и их обсуждение

Для конкретных вычислений предлагаемый метод реализуется в виде следующей схемы:

— устанавливаются условия конкретного нагружения машины;

— определяются параметры суммарного воздействия на элемент конструкции в виде проекций P_x, P_y, P_z результирующего вектора на оси координат. Силы P_x, P_y, P_z в сочетании с эксцентриситетами их приложения определяют величины моментов M_x, M_y, M_z;

— вычисляются соотношения составляющих усилий P_x/P_y, P_x/P_z**.**

Необходимости вычислять отношение других составляющих нет, т. к. они однозначно определяются по P_x и первым двум отношениям;

— строятся эпюры нормальных σ и касательных τ напряжений, вызываемых в рассчитываемой детали нагрузками P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z. При этом возможны четыре случая:

— ни в одной точке сечения детали, ни на одной из эпюр напряжения не достигают предела текучести;

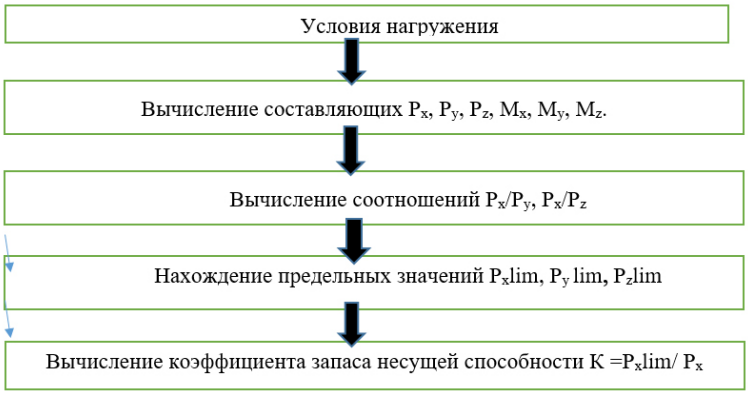
— в крайних точках сечения хотя бы на одной из эпюр напряжения достигают предела текучести;

- в части сечения детали напряжения достигают предела текучести, т. е. имеется зона пластического состояния;

-- по всему сечению детали напряжения либо σ, либо τ достигли предела текучести. При получении результата, соответствующего последнему пункту, делается вывод об исчерпании несущей способности и расчеты прекращаются. В случае получения результатов, соответствующих первым трем пунктам, расчеты продолжаются;

- увеличиваются ступенями P_x, P_y, P_z с сохранением соотношений P_x/P_y, P_x/P_z и, следовательно, с сохранением вида эпюр, полученных по предыдущему пункту. Для каждой ступени нагрузки просчитываются значения ординат эпюр. Увеличение нагрузки прекращается, когда одна из эпюр, либо σ, либо τ примет вид, характерный для случая образования пластического шарнира. Соответствующие этому случаю значения условий $P_x\lim$, $P_y\lim$**,** $P_z\lim$, являются предельными для данного условия нагружения;

- вычисляется значение коэффициента запаса несущей способности детали $K = P_x\lim/P_x$. Принципиальная схема его определения примет вид:



Заключение. Предлагаемый метод вычисления коэффициента запаса несущей способности легко реализуется на компьютере, что позволяет на стадии проектирования точнее определять прочностные характеристики оборудования различных машин, а также строительных конструкций.

Список литературы

1. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М., Машиностроение, 1981, 272 с.
2. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты на прочность деталей машин. М., Машиностроение, 1975. 488 с.
3. Чернин И. М. Расчет деталей машин. М.: Высшая школа, 1978.
4. Дунаев Д. Ф. Конструирование узлов и деталей машин. 3 – е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1978.
5. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975.
6. Бриль С.И. Исследование работы и методика проектирования рабочих органов ямокопателей. Труды ВИСХОМа, № 36. М.: 1962.

7. Гуськов В.В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных агрегатов. М.: Машиностроение, 1996.
8. Орловский С.Н. Определение энергетических и динамических параметров тракторов, режимов резания активных рабочих органов машинно-тракторных агрегатов: моногр. Красноярск, КрасГАУ, 2011. 376 с.

Саая Сай-Суу Шолбановна, старший преподаватель, sai-suu2014@yandex.ru, Россия, Республика Тыва, Кызыл, Тувинский государственный университет,

Кенден Кара-кыс Вадимовна, канд. техн. наук, доцент, kuca08@mail.ru, Россия, Республика Тыва, Кызыл, Тувинский государственный университет

METHOD OF ASSESSING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF STRUCTURES

S.Sh. Saaya, K.V. Kenden

A description of the method for determining the safety factor of the bearing capacity of machine parts when calculating them according to limit states is given. The purpose of this study is to substantiate the optimal parameters of the supporting structure of machine parts. The subject of the study is the theory of strength of the supporting structure of machine parts. A scheme for implementing the method is given, allowing for automated calculations.
Key words: structures, loads, stresses, assessment, method, safety factor.

Saaya Aisuu Sholbanovna, senior lecturer, sai-suu2014@yandex.ru, Russia, Republic of Tyva, Kyzyl, Tuva State University,

Kenden Kara-kys Vadimovna, candidate of technical sciences, docent, kuca08@mail.ru, Russia, Republic of Tyva, Kyzyl, Tuva State University

УДК 614.8.084
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-343-344

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОПОВЕЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ КРУПНЫХ ГОРОДОВ

Е.М. Леонова, А.Н. Леонова

Статья рассматривает актуальные вопросы оповещения населения, которые в настоящее время приобретают ключевое значение при защите населения в чрезвычайных ситуациях различного характера. За последние двадцать лет все большее число городов России получает статус крупных городов, рост численности которых оказывает существенное влияние на способы организации оповещения населения. Использование современных цифровых технологий оповещения населения — это не просто техническая задача, это вопрос обеспечения безопасности людей в условиях растущих угроз.
Ключевые слова: оповещение населения, чрезвычайные ситуации, экстренная информация, передача сообщений, сирены.

Повышение уровня технологичности повседневной жизни населения способствует росту рисков возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера (ЧС) в городах. В связи с этим, оповещение населения в крупных городах о ЧС – это задача, требующая комплексного подхода, учитывающего особенности городской среды, разнообразие потребностей и возможностей жителей. Приведем простой пример. В целях улучшения экологической обстановки в городах происходит замена автобусов на электробусы, населением начато активное использование экономичных электромобилей. Вместе с тем, аварии с электромобилями несут риски для окружающих не только как дорожно-транспортные происшествия и аварии, но и специфические опасности — пожарную опасность, которую представляют аккумуляторные батареи. В электромобилях используются литий-ионные аккумуляторы, которые при повреждении в аварии могут загореться. Пожары таких аккумуляторов очень интенсивны [1]. Для их тушения используются специальные методы тушения, ибо обычные методы могут быть неэффективны. При эксплуатации электромобилей существуют риски:

— отравления токсичными газами, выделяемыми из аккумулятора при утечке или при неправильном обращении;

— поражения электрическим током при повреждении электропроводки в процессе аварии.

Даже факт пожара электромобиля на дороге повышается роль своевременного предупреждения граждан о возникновении ЧС, которое может проводиться различными способами: передачей сообщений через средства массовой информации, рассылкой СМС, размещением в новостных блоках интернет-провайдеров. Наиболее вероятно, что в случае аварии с электромобилем оповещение будет осуществлено только через социальные сети. В настоящее время граждане, объединенные в различные социальные группы, постоянно обмениваются экстренной или важной на их взгляд информацией, например, о пробках, возникших на автодорогах или других происшествиях и ЧС. Однако, о выхлопе токсичных газов должна оповещать единая дежурно-диспетчерская служба города городские служб, входящие в аппаратно-программного комплекса «Безопасный город» [2].

Взрывной рост информационных технологий в последние годы вывел борьбу за внимание людей на недосягаемый уровень. Ежедневно на каждого человека обрушивается шквал информации: новостные ленты интернет-каналов, реклама, электронная почта, специальные предложения, уникальные акции, и т.д. В этом непрекращающемся потоке определить полезную составляющую от информационного шума становится весьма непросто. Более

других в данной сфере преуспели направления маркетинга и рекламы. При разработке рекламных концепций, как долговременных, так и краткосрочных, ведется акцентирование на смежные каналы донесения информации до населения. Что это означает? То, что при создании рекламного образа товара используется не только профильный канал доведения информации, но и смежные, так, при рекламе духов (центральный канал воздействия – обоняние) затрагиваются визуальные каналы (форма, упаковка, подача). Таким образом, суммарный информационный поток кратно увеличивается количеству каналов воздействия.

В зависимости от физиологических возможностей человек способен одновременно обрабатывать и фильтровать ограниченное количество событий по ограниченному количеству каналов восприятия. Если в момент проведения оповещения о ЧС слуховой канал восприятия занят, например, прослушиванием музыки или разговором с интересным собеседником, то оповещение данного человека традиционным способом – передачей речевого сообщения по телерадиовещанию или уличной звукофикации информация оповещения может быть не доведена. Следовательно, можно выделить три основные проблемы доведения экстренной информации оповещения по каналам восприятия человека:

канал восприятия занят, так как в данный момент времени человек воспринимает иную информацию;

канал восприятия закрыт: человек не воспринимает информацию ввиду различных физических и психологических причин, например, сон или выключены все возможные технические средства доведения информации (телевидение, радиовещание, сотовый телефон, интернет);

канал восприятия доступен, но информация не воспринимается, например, СМС-сообщение или сообщение в социальной сети не воспринимается как важное.

Следовательно: для оповещения населения крупных городов необходимы:

многоканальность, заключающаяся в использовании различных каналов для охвата различных групп населения от традиционных (телевидение, радиовещание, сирены, громкоговорители) до современных технологий (SMS-сообщения, мобильные приложения, push-уведомления, интернет-порталы, социальные сети).

целевая доставка экстренной информации оповещения (на открытых пространствах городов (улицы, парки, дворы) до оповещения в жилых зданиях, транспортных средствах, социальных, культурно-просветительских, спортивных, бытовых и др. объектах города с учетом местоположение населения, возраст, состояние здоровья.

интерактивность, то есть возможность получения обратной связи от жителей, уточнения информации путем проведения опросов населения.

Главное – это повышение значимости сигналов и информации оповещения путем привлечения внимания каждого человека. Для этого первое, что необходимо сделать, организовать обучение населения действиям по сигналу оповещения.

В настоящее время стандартным способом передачи экстренной информации является передача сообщений из студий телерадиовещания профессиональными дикторами с перерывом телевизионных и радиопередач. Данный вид оповещения позволяет получить более высокую энергетическую насыщенность речевого и видеосигнала. При возникновении ЧС реакция человека – действовать оперативно, следовательно, темп при прямой передаче речи у диктора может быть непроизвольно выше темпа, обеспечивающего уровень восприятия сообщения индивидуумом. Поскольку для привлечения внимания человека к экстренному сообщению важно осуществить правильное формирование и доведение информации, исключающее двоякое или неполное толкование, целесообразно при передаче с рабочего места дежурно-диспетчерских службы предварительно записанных или прямых необходимо, чтобы сообщение содержало максимально конкретные фразы, исключающие двоякое толкование, не имеющее эмоциональной или субъективной окраски для населения.

Основные каналы восприятия информации человеком приведены на рисунке.



Основные каналы восприятия информации человеком

В литературе встречаются распределения, отличающиеся значениями показателей восприятия информации, но во всех источниках [3-5] доминируют три канала восприятия информации: визуальный, аудиальный и кинестетический. Между тем есть еще четвертый способ восприятия информации — через логическое осмысление, но практически все сводятся к одному максимально доминирующему воздействию - визуальному каналу [6], то есть основные информационные потоки сосредоточены на визуальном канале. Поэтому практически на всех улицах, площадях городов установлена наружная реклама. В системе оповещения населения визуальный канал используется для информирования населения при угрозе возникновения или в условиях ЧС. Примером реализации такого подхода к оповещению населения были созданные в начале 2000 годов Общероссийская комплексная система информирования и оповещения населения (ОКСИОН) и системы защиты от угроз природного и техногенного характера, информирования и оповещения населения на транспорте (СЗИОНТ) [7-8] элементы которой были смонтированные на железнодорожных и автовокзалах, станциях метрополитена.

В настоящее время в качестве сигнала для привлечения внимания используется сигнал «Внимание всем!», представляющий собой звук электромеханической сирены, работающей в прерывистом режиме. Задача данного сигнала - привлечение внимания человека по аудиальному каналу к угрозе возникновения или возникшей ЧС. Несмотря на достаточно высокую эффективность данного сигнала, целесообразно рассматривать и иные сигналы для привлечения внимания, уточнить порядок (алгоритм) задействования систем оповещения населения при опасностях, возникающих при военных конфликтах или вследствие этих конфликтов.

Для того чтобы завладеть вниманием человека и донести до него экстренную информацию о фактических и прогнозируемых опасных явлениях и процессах, требуется применение специальных методов, способов подачи информации. Подготовка и трансляция экстренных сообщений должны претерпеть изменения в сторону увеличения разборчивости и исключения двоякого толкования, но ключевым элементом повышения эффективности оповещения является постоянная работа с населением по подготовке к действиям при возникновении ЧС, повышению осведомленности и формированию ответственного отношения к безопасности. С этой целью необходимо:

проводить информационные кампании для повышения осведомленности населения о рисках, важности своевременного оповещения, правилах поведения в ЧС.

разрабатывать индивидуальные планы действия для жителей каждого района (микрорайона) города, включая пункты сбора, конкретные способы оповещения, в том числе по системе домофонной связи.

Комплексное решение вопросов оповещения о ЧС в крупных городах – это необходимость для сохранения жизни и имущества населения в ЧС. Правильная организация систем оповещения, подготовка населения, координация действий и использование современных технологий являются ключевыми факторами для обеспечения безопасности населения в крупных городах.

Список литературы

1.Бесшумный убийца: почему смертельно опасно попасть в аварию с электромобилем [Электронный ресурс] режим доступа: avtovzglyad.ru, дата обращения 23.10.2024.

2. Журнал Технология гражданской безопасности 4 выпуск. С. 77-82. [Электронный ресурс] URL: https://www.vniigochs.ru (дата обращения: 23.10.2024).

3. Информирование населения в чрезвычайных ситуациях: основные аспекты, проблемы и особенности, М., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023 г. 108 с.

4.Аюбов Э.Н., Новиков О.Н., Буевич О.Е. Основные аспекты информационного воздействия на население на современном этапе // Технологии гражданской безопасности. 2021. Т. 18. № S. С. 104–112. 20.

5. Аюбов Э.Н. Психологические аспекты воздействия чрезвычайных ситуаций на человека // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2022. № 1 (11). С. 27–32.

6. Янковский С.Я. Концепции общей теории информации // Библиотека учебной и научной литературы, 2016. 27 с.

7. Отчет для промежуточной оценки научно-исследовательской работы «Разработка государственного стандарта, определяющего протоколы информационного обмена технических средств оповещения населения». М., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2022. 148 с.

8. Отчет о НИР «Проведение мониторинга и экспертизы выполнения мероприятий программы по созданию системы защиты от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, информирования и оповещения населения на транспорте», Книга 1, М., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012, 291 стр.

Леонова Елена Михайловна, старший научный, elenaleon@mail.ru, Россия, Москва, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий),

Леонова Алла Николаевна, научный сотрудник, all_leo@mail.ru, Москва, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий)

CURRENT ISSUES OF ALERTING THE POPULATION OF LARGE CITIES

E.M. Leonova, A.N. Leonova

The article examines topical issues of public awareness in the context of rapid urban growth and urbanization, as well as the increasing threat of man-made disasters and natural disasters. The issues of the effectiveness of public notification are of key importance.

Key words: public notification, emergencies, emergency information, message transmission, sirens.

Leonova Elena Mikhailovna, senior researcher, elenaleon@mail.ru, Russia, Moscow, All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Emercom of Russia (Federal Center for Science and High Technologies),

Leonova Alla Nikolaevna, researcher, all_leo@mail.ru, Russia, Moscow, All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Emercom of Russia (Federal Center for Science and High Technologies)

УДК 004.021
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-346-347

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ КЛИЕНТА В CALL-ЦЕНТРАХ

П.А. Рудакова, Т.А. Семенов, А.А. Сычугов, В.В. Котов

В статье особое внимание уделено формализации задачи оценки удовлетворённости клиентов, анализе различных подходов к её решению с использованием машинного обучения и речевой аналитики, а также их применимости. Целью данной статьи является исследование и оценка потенциала использования современных технологий машинного обучения и анализа эмоций в речи для определения уровня удовлетворенности клиентов call-центров. Заключительная часть статьи посвящена выбору наиболее подходящего метода, построению модели и её применению на наборе данных для демонстрации эффективности предложенного подхода. В результате выявлено, что модели продемонстрировали хорошую способность к распознаванию эмоциональной окраски и адекватному предсказанию уровня удовлетворенности клиентов. Авторами был сделан вывод, что интеграция анализа эмоций и сентимента позволяет более точно оценивать восприятие услуг клиентами.

Ключевые слова: нейросетевые технологии, удовлетворенность клиентов, сверточные нейронные сети, мел-кепстральные коэффициенты, технологии распознавания речи, полносвязная нейронная сеть.

На рубеже тысячелетий произошло становление и последующее закрепление в качестве доминирующего подхода в теории и практике маркетинговой деятельности концепции маркетинга взаимоотношений. Ее ключевая идея заключается в рассмотрении партнерских взаимодействий в качестве наиболее ценного актива для компаний, ведущих свою деятельность в современных условиях, характеризующихся высоким уровнем конкуренции и постоянно нарастающей турбулентностью [1].

Основное общение с клиентами в современном мире осуществляется посредством телефона через операторов call-центра. Контактный центр – это централизованный отдел, в который направляются телефонные звонки от текущих и потенциальных клиентов. Такие центры могут располагаться либо внутри компании, либо переданы на аутсорсинг другой компании, которая специализируется на этом. Центр обработки входящих вызовов одновременно обрабатывает значительный объем вызовов, просматривает и перенаправляет вызовы кому-либо, имеющему на это право, и регистрирует вызовы. Интерактивная система голосового ответа (IVR) отвечает на вызовы и использует технологию распознавания речи, чтобы либо отвечать на запросы клиентов с помощью автоматического сообщения, либо направлять вызовы соответствующим операторам или получателям центра обработки вызовов через автоматического распределителя вызовов [2].

В современной бизнес-среде, где конкуренция за клиента становится всё острее, качество обслуживания клиентов в call-центрах играет решающую роль в создании положительного имиджа компании и укреплении её позиций на рынке. Эффективность взаимодействия с клиентами напрямую влияет на их удовлетворённость и лояльность, что, в свою очередь, стимулирует повторные обращения и рекомендации их услуг другим. В этом контексте, возможность точно и оперативно оценивать удовлетворенность клиентов является не просто желательной, но и необходимой задачей для любого предприятия, стремящегося к успеху.

С развитием технологий машинного обучения и речевой аналитики открываются новые возможности для автоматизации и усиления процессов мониторинга и управления клиентским опытом [3]. Машинное обучение и речевая аналитика позволяют не только эффективно обрабатывать большие объемы информации, но и выявлять скрытые закономерности в речевом поведении клиентов, что может служить надежным индикатором их удовлетворенности услугами. Это особенно важно в условиях, когда традиционные методы опросов и анкетирования могут быть недостаточно быстры или точны, или, когда они могут быть навязчивыми и вызывать отторжение у клиентов. Основной целью реализации сервиса является обработка аудиофайла для выявления нежелательного контента как со стороны клиента, так и со стороны сотрудника центра обработки звонков. Список эмоций может быть крайне большим, начиная от легкой симпатии и заканчивая явным презрением. Однако, для облегчения решения задачи они были обобщены в три группы: положительные, негативные, нейтральные. Так как даже при виде человека в живую, очень сложно определить каждую даже опытным специалистам [4].

Цель данной статьи – исследовать и оценить потенциал применения современных технологий машинного обучения и анализа эмоций в речи для определения уровня удовлетворенности клиентов call-центров. Основное внимание уделено тому, как данные технологии могут интегрироваться в существующие системы обслуживания клиентов, и какие преимущества это может принести для бизнеса.

Для формализации задачи оценки удовлетворенности клиентов в call-центрах посредством анализа речи необходимо определить ключевые переменные и параметры, влияющие на итоговую оценку. Удовлетворенность клиента не ограничивается только содержанием разговора; она также включает эмоциональную окраску и способ представления информации.

Определим ключевые переменные:

1. Эмоциональная окраска речи (E). Включает анализ спектра эмоциональных состояний, таких как радость, гнев, грусть, страх, удивление и нейтральность. Эмоциональная окраска может быть измерена через различные акустические признаки, включая интонацию, темп речи и громкость [5].

2. Сентимент речи (C). Анализ сентимента текстов разговоров направлен на выявление эмоциональной окраски высказываний клиентов, определение их настроения и эмоциональных реакций, таких как недовольство, удовлетворение или нейтральное отношение к продуктам или услугам [6].

Для количественной оценки удовлетворенности вводится переменная S, представляющая уровень удовлетворенности клиента. Эта переменная вычисляется как функция от параметров речи:

$$S = f(E, C),$$

где E – эмоциональная окраска, измеренная по акустическим признакам, C – эмоциональная окраска, измеренная на основе анализа текста речи, отражающая сентимент высказываний.

Функция f может быть определена с использованием методов машинного обучения, где входными данными являются извлеченные характеристики речи, а выходом – оценка удовлетворенности клиента.

Задача состоит в разработке и обучении модели, способной интерпретировать речевые данные и преобразовывать их в метрики, коррелирующие с удовлетворенностью клиента. Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие шаги:

1. Определение и формализация переменных. Точное определение переменных E и C.

2. Разработка функции оценки удовлетворенности. Создание модели *f(E,C)*, которая будет использовать обработанные данные для вычисления уровня удовлетворенности клиентов.

3. Сбор и подготовка данных. Агрегация аудиозаписей и транскрипций разговоров, а также соответствующих оценок удовлетворенности, полученных от клиентов.

4. Обучение и валидация модели. Применение методов машинного обучения для обучения модели на основе собранных данных и последующая оценка её эффективности на тестовом наборе данных.

5. Анализ результатов и оптимизация. Оценка точности, полноты и других метрик качества модели с целью её дальнейшей оптимизации на основе полученных результатов.

Разработка такой модели позволит автоматизировать процесс оценки удовлетворенности клиентов, что в свою очередь улучшит качество обслуживания и повысит эффективность работы call-центров.

Для извлечения переменной эмоциональной окраски речи (*E*), определенной в рамках нашей задачи, мы применяем методы обработки аудиосигналов с использованием сверточных нейронных сетей (СНС). Эмоциональная окраска речи — это комплексный параметр, который может быть в достаточной степени точно определён с помощью модели СНС, классифицирующей эмоции. Сверточные нейронные сети широко используются не только в задачах компьютерного зрения и анализа изображений, но и активно внедряются в область обработки аудиосигналов. Их основное преимущество в контексте речевой аналитики заключается в способности автоматически извлекать значимые признаки из входных данных без необходимости ручного указания этих признаков [7-9].

Все современные системы распознавания речи имеют схожую архитектуру [10] (рис.).



Структура систем распознавания речи

Основным методом получения признаков для дальнейшего распознавания речи является метод выделения мел-кепстральных коэффициентов (Mel Frequency Cepstral Coefficients, MFCC), которые позволяют более точно моделировать восприятие человеком звуковых частот [11]. Мел-кепстральные коэффициенты (MFCC) – это набор признаков, которые эффективно описывают форму звукового спектра, базируясь на восприятии звуков человеческим ухом. MFCC являются одним из наиболее эффективных методов получения признаков для дальнейшего распознавания речи. Они позволяют выделить кепстральные признаки, отражающие особенности фильтра речевого тракта, что значительно повышает точность распознавания, особенно в дикторонезависимых системах [12]. MFCC учитывают нелинейную частотную шкалу, основанную на мел-шкале, которая соответствует воспринимаемой человеком высоте звука.

Сверточные нейронные сети демонстрируют высокую эффективность в задачах определения эмоционального состояния говорящего [13,14]. В контексте анализа речи, сверточные сети обычно работают со спектрограммами и мел-кепстральными коэффициентами или спектрограммами, которые представляют собой визуальное изображение частотного спектра звука во времени. В технологиях распознавания речи человека спектрограммы являются перспективным источником данных для анализа формантного состава звуков речи с помощью нейронных сетей. Они визуализируют динамическое изменение интенсивности частотных составляющих сигнала. Ввиду того, что звук и, в частности, речевые сообщения, остается наиболее естественной формой обмена информацией, данное направление востребовано в различных технологиях, связанных с обработкой звуковых данных [15,16]. Сверточные слои автоматически определяют и выделяют значимые паттерны в этих данных, что может включать особенности дикции, интонации или эмоциональной окраски речи [17].

Математически операцию свертки можно представить как:

$$S(i,j) = (I \times K)(i,j) = \sum_m \sum_n I(m,n)K(i-m, j-n)$$

где I — это входное изображение спектрограммы, K — ядро свертки, а $S(i,j)$ — сгенерированные свойства или признаки.

После операции свертки в сверточных нейронных сетях (СНС) обычно следует применение функции активации, такой как ReLU (Rectified Linear Unit), которая добавляет нелинейность в обработку данных, необходимую для эффективного обучения сложных задач. Это шаг критичен, поскольку он помогает модели лучше различать разные типы сигналов и паттернов в данных. После функции активации обычно следует операция пулинга, которая уменьшает размерность выходных данных из сверточных слоев, сохраняя при этом важные признаки. Пулинг улучшает устойчивость модели к небольшим изменениям и смещениям во входных данных, а также помогает уменьшить количество параметров и вычислительную сложность модели [18].

В контексте анализа речи и звуков мел-кепстральные коэффициенты и спектрограммы являются двумя распространенными типами входных данных для сверточных нейронных сетей. Они отражают мел-шкалу частот, которая мимикрирует чувствительность человеческого уха к различным тонам. Обычно MFCC используются в зада-

чах распознавания речи и идентификации говорящего, поскольку они эффективно кодируют тембральные характеристики звука [19].

Чтобы формализовать процесс классификации эмоций на основе акустических признаков и корректно интегрировать его с другими компонентами модели, определим математическое представление параметра E, отражающего эмоциональную окраску речи. Эта модель анализирует различные акустические характеристики голоса и выдает вектор вероятностей принадлежности аудиосигнала к одному из классов эмоций: "Нейтрально", "Спокойно", "Радостно", "Грустно", "Злость", "Испуг", "Отвращение", "Удивление". Математически можно описать в виде вектора акустических признаков, извлекаемых из аудио сигнала:

$$E = [e_1, e_2, \ldots, e_8],$$

где каждый элемент e_i вектора представляет собой вещественную вероятностную меру эмоциональной окраски речи со значением от 0 до 1.

Для оценки удовлетворённости клиента на основе анализа эмоциональности содержания его речи, аудиозапись сначала должна быть преобразована в текст с помощью технологии распознавания речи (Speech-to-Text, STT). Этот процесс позволяет получить текстовую расшифровку разговора, которая затем анализируется на предмет сентимента.

Оценка сентимента текста — это задача классификации текста, при которой определяется эмоциональный тон текста, например, как положительный, нейтральный или отрицательный. В отличие от методов, использующих сверточные нейронные сети для анализа эмоций на основе визуальных или акустических признаков, анализ сентимента сосредоточен исключительно на тексте, работая с его лексической и грамматической структурой. Для решения этой задачи применяются различные методы машинного обучения и обработки естественного языка [20]:

1. Лексиконные подходы. Используют предварительно составленные списки слов с заранее заданными тональностями (например, словари AFINN, SentiWordNet). Эти методы оценивают сентимент текста на основе количества положительных и отрицательных слов.

2. Машинное обучение. Методы машинного обучения, такие как наивный байесовский классификатор, метод опорных векторов (SVM) и нейронные сети, обучаются на наборах данных, содержащих тексты с заранее размеченным сентиментом. Эти модели учатся определять сентимент на основе признаков текста.

3. Глубокое обучение. Современные модели, основанные на нейронных сетях, такие как LSTM (Long Short-Term Memory) и трансформеры (например, BERT - Bidirectional Encoder Representations from Transformers), эффективно работают с контекстуальными зависимостями в тексте и могут выдавать более точные результаты оценки сентимента.

В контексте нашего исследования параметр C, представляющий сентимент текста, математически описывается как вектор вероятностей, полученный из модели анализа сентимента. Этот вектор отражает вероятности принадлежности текста к определённым эмоциональным категориям, таким как положительный, нейтральный или отрицательный:

$$C = [c_1, c_2, c_3],$$

где c_1, c_2, c_3 представляют вероятности того, что текст выражает положительный, нейтральный и отрицательный сентименты соответственно.

Таким образом процесс извлечения параметра C выглядит следующим образ:

1. Анализ сентимента. Используя модель глубокого обучения, такую как LSTM или BERT, текстовая транскрипция обрабатывается для классификации сентимента. Модель вычисляет вероятности принадлежности текста к каждой из эмоциональных категорий.

2. Преобразование вывода модели. Выход модели, представляющий собой вероятности для каждой категории сентимента, преобразуется в вектор C, который используется далее для анализа удовлетворенности клиента.

Для проверки точности и надежности модели анализа сентимента, она должна быть обучена на большом корпусе текстов с заранее размеченными эмоциональными категориями. Валидация происходит путем тестирования модели на независимой выборке данных, что позволяет оценить, насколько точно модель определяет сентимент текста.

В рамках нашего исследования функция *f,* предназначенная для оценки удовлетворённости клиентов, может быть определена как полносвязная нейронная сеть (FCNN). Эта модель позволяет комплексно анализировать и интегрировать информацию из различных входных данных, в данном случае из переменных E (эмоциональная окраска речи) и C (оценка сентимента текста).

Полносвязная нейронная сеть состоит из нескольких слоёв, каждый из которых связан со всеми нейронами предыдущего слоя. Это создаёт плотную сеть связей, где информация обрабатывается последовательно через каждый слой:

$$f(x) = \sigma(W_n \times (\ldots \sigma(W_2 \times \sigma(W_1 \times x + b_1) + b_2)\ldots) + b_n),$$

где *x* – входной вектор, состоящий из объединённых переменных *E* и *C*; W_i и b_i– веса и смещения *i*-го слоя сети; σ – функция активации, такая как ReLU или сигмоид, которая применяется после каждого линейного преобразования.

Процесс обучения полносвязной нейронной сети начинается с подготовки данных, которая включает нормализацию входных данных для улучшения сходимости обучения. Далее, набор данных разделяется на тренировочные, валидационные и тестовые подмножества. В процессе обучения сети используются алгоритмы оптимизации, такие как стохастический градиентный спуск или Adam, для минимизации ошибки между предсказаниями сети и реальными данными удовлетворенности клиентов.

Для обучения и оценки моделей были использованы комбинированные датасеты, включающие:

1. Эмоциональные аудиокорпусы:

• Emo-DB: Немецкий эмоциональный речевой корпус, содержащий 535 аудиозаписей с семью эмоциональными состояниями: гнев, скука, отвращение, страх, радость, грусть и нейтральность.

• IEMOCAP: Многофункциональный датасет, состоящий из приблизительно 12 часов аудиовизуальных данных на английском языке, аннотированных по эмоциональным меткам.

2. Реальные аудиозаписи звонков:

• Аудиозаписи звонков были отобраны вручную из открытых источников и размечены аннотациями по уровню удовлетворенности клиентов.

Анализ данных

1. Распределение эмоций. В объединенном датасете представлено шесть основных эмоциональных состояний. Распределение по эмоциям было следующим: нейтральность (40%), радость (15%), грусть (15%), гнев (10%), страх (10%), отвращение (10%).

2. Распределение уровней удовлетворенности. Уровни удовлетворенности клиентов распределились следующим образом:

1 – крайне не удовлетворен (10%),
2 – не удовлетворен (15%),
3 – нейтрально (30%),
4 – удовлетворен (25%),
5 – полностью удовлетворен (20%).

Предобработка данных

1. Аудиоданные. Проведена очистка и нормализация аудиоданных: применены фильтрации высоких и низких частот для удаления шумов и артефактов, выравнены уровни громкости записей для обеспечения консистентности данных.

Извлечены признаки:

• MFCC: вычислены 13 мел-кепстральных коэффициентов для каждого аудиофрейма с окном 25 миллисекунд и шагом 10 миллисекунд.

• Дельта-коэффициенты: Вычисление первых и вторых производных MFCC для учета динамики изменения признаков.

2. Текстовые данные.

• Распознавание речи. Аудиозаписи преобразованы в текст с помощью автоматических систем распознавания речи (ASR).

• Очистка текста. Удалена пунктуация, стоп-слова, текст приведен к нижнему регистру.

• Лемматизация и стемминг. Слова приведены к базовым формам для уменьшения размерности и улучшения качества векторизации.

• Векторизация. TF-IDF: тексты преобразованы в векторы признаков с использованием метода TF-IDF. Эмбеддинги слов: использованы предобученные модели Word2Vec или GloVe для представления слов в виде векторов в высокомерном пространстве.

Модели машинного обучения

1.Классификация эмоциональной окраски речи: Сверточная нейронная сеть (CHC).

• Архитектура: Три сверточных слоя с фильтрами размеров 32, 64 и 128, каждый из которых сопровождается слоем подвыборки (Pooling). Затем следуют два полносвязных слоя с 256 и 64 нейронами и выходной слой с функцией softmax.

• Гиперпараметры: Использована функция активации ReLU, пакетная нормализация и Dropout с вероятностью 0,5 для предотвращения переобучения.

• Обучение: Оптимизатор Adam с начальной скоростью обучения 0,001 и функцией потерь Cross-Entropy.

2.Анализ сентимента текста: Модель BERT.

• Настройка: Использована предобученная модель BERT-base с дополнительным слоем классификации.

• Тонкая настройка (Fine-tuning): Модель дообучалась на нашем датасете с использованием небольшого коэффициента обучения (2e-5) и метода ранней остановки для предотвращения переобучения.

3. Оценка уровня удовлетворенности клиентов: Полносвязная нейронная сеть (FCNN).

• Входные данные: Объединенные признаки из аудио (эмоциональные признаки) и текста (результаты сентимент-анализа).

• Архитектура: Три скрытых слоя с 128, 64 и 32 нейронами соответственно, с функцией активации ReLU.

• Выходной слой: Один нейрон с линейной активацией для предсказания уровня удовлетворенности.

• Обучение: Функция потерь MSE, оптимизатор Adam, скорость обучения 0,0001.

Процесс обучения и валидации

1. Разделение данных. Датасет был разделен на тренировочную (70%), валидационную (15%) и тестовую (15%) выборки с соблюдением равномерного распределения по классам.

2. Метрики оценки.

• Для классификации эмоций и сентимента: Точность (Accuracy), полнота (Recall), точность (Precision), F1-мера (F1-score).

• Для регрессии уровня удовлетворенности: Среднеквадратическая ошибка (MSE), коэффициент детерминации (R^2).

Результаты

1.Классификация эмоциональной окраски речи:

• Точность на тестовой выборке: 82%.

• F1-мера: Средневзвешенное значение 0,81.

• Матрица ошибок: Наиболее частые ошибки наблюдались при различении эмоций «страх» и «грусть».

2.Анализ сентимента текста:

• Точность на тестовой выборке: 85%.

• F1-мера: 0,84.

• Замечания: Модель BERT эффективно справилась с пониманием контекста и тональности высказываний.

3.Оценка уровня удовлетворенности клиентов:

• Среднеквадратическая ошибка (MSE): 0,12 на тестовой выборке.

• Коэффициент детерминации (R^2): 0,88, что указывает на высокую степень объяснения дисперсии данных моделью.

• Сравнение с базовой моделью: Простая линейная регрессия показала MSE 0,25 и R^2 0,65, что подтверждает преимущество предлагаемой модели.

Анализ полученных результатов

Классификация эмоциональной окраски речи. Модель СНС продемонстрировала высокую эффективность в распознавании эмоциональных состояний по аудиоданным. Точность 82% сопоставима с результатами современных исследований в области обработки речи. Однако ошибки в различении похожих эмоций, таких как «страх» и «грусть», указывают на необходимость улучшения модели, возможно, через увеличение объема данных или применение более сложных архитектур.

Анализ сентимента текста. Использование модели BERT позволило достичь высокой точности в анализе тональности текстовых данных. Это подчеркивает эффективность трансформерных моделей в задачах обработки естественного языка, особенно в понимании контекстуальных нюансов и скрытых смыслов.

Оценка уровня удовлетворенности клиентов. Интеграция аудио- и текстовых признаков в полносвязной нейронной сети привела к значительному улучшению точности предсказания уровня удовлетворенности клиентов. MSE 0,12 и высокий R^2 свидетельствуют о том, что модель успешно улавливает сложные зависимости между эмоциональным состоянием клиента, содержанием разговора и его удовлетворенностью.

Комбинирование аудио- и текстовых данных оказалось эффективным для более точной оценки удовлетворенности клиентов. Этот мультимодальный подход учитывает как эмоциональные, так и содержательные аспекты взаимодействия.

Высокое качество аннотаций и балансировка классов в датасете способствовали достижению высоких показателей точности. Тем не менее, ограниченный объем реальных звонков может влиять на обобщающую способность модели.

Однако выделяются следующие ограничения:

1.Языковые различия. Использование датасетов на разных языках может создавать дополнительные сложности и требует адаптации моделей к конкретному языку.

2.Шум и артефакты. Несмотря на предпринятые меры по очистке данных, остаточные шумы могут негативно влиять на точность моделей, особенно в реальных условиях колл-центров.

Возможные пути улучшения.

1.Расширение датасета:

• Сбор большего объема реальных данных. Увеличение количества размеченных аудиозаписей реальных звонков позволит модели лучше обобщать и повышать ее применимость в практике.

• Многоязычные данные. Интеграция данных на разных языках и адаптация моделей для многоязычной обработки.

2.Улучшение моделей:

• Модели с механизмом внимания. Внедрение архитектур с механизмами внимания (Attention) для лучшего учета контекстуальных зависимостей в данных.

• Мультимодальные трансформеры. Использование моделей, способных одновременно обрабатывать аудио- и текстовые данные, таких как SpeechBERT или модифицированные версии существующих трансформеров.

3.Тонкая настройка гиперпараметров:

• Автоматизированный поиск. Применение методов байесовской оптимизации или гипероптимизации с помощью библиотек вроде Hyperopt для поиска оптимальных значений гиперпараметров.

4.Аугментация данных:

• Техники увеличения данных. Применение методов аугментации аудио (например, добавление искусственного шума, изменение высоты тона) и текстовых данных (перефразирование, синонимизация) для повышения устойчивости модели.

5.Учёт дополнительных факторов:

• Метаданные звонков. Включение в модель информации о длительности звонка, времени суток, исторических данных о клиенте.

• Анализ речи оператора. Оценка влияния поведения и речи оператора на удовлетворенность клиента.

Проведенное исследование подтвердило эффективность использования современных методов машинного обучения и глубоких нейронных сетей для оценки удовлетворенности клиентов на основе анализа речи в колл-центрах. Мультимодальный подход, объединяющий аудио- и текстовые данные, позволяет получить более точные и надежные результаты, что имеет непосредственное практическое применение для улучшения качества обслуживания и повышения лояльности клиентов.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на преодоление выявленных ограничений, расширение объема и качества данных, а также на внедрение более продвинутых моделей, учитывающих сложные контекстуальные и эмоциональные зависимости в коммуникации между клиентом и оператором.

Список литературы

1. Лисин Н. В., Агеносов А. В., Пьянзина Е. П., Хмелькова Н. В. Совершенствование маркетинговых взаимодействий компании на основе технологий распознавания речи // Вестник Гуманитарного университета. 2022. 2(37). С. 24 – 30. DOI 10.35853/vestnik.gu. 2022.2(37).02.

2. Седойкина А.А. Перспективы внедрения системы искусственного интеллекта для повышения эффективности бизнес-процессов в call-центре // Human Progress. 2020. № 6 (2). С. 7. DOI 10.34709/IM.162.7

3. Старостин В. С. Трансформация маркетинговых технологий в эпоху машинного интеллекта // Вестник ГУУ, 2018. №1. С. 28 – 34.

4. Никифоров А.А. Разработка модуля распознавания эмоций разговора колл-центра с использованием рекуррентных искусственных нейронных сетей, для выявления нежелательного контента // Вестник науки. 2023. № 7 (64). С. 226 – 232.

5. Сергунов Д.И., Артемова А.А., Гришунов С.С. Система распознавания эмоций по голосу на основе сверточной нейронной сети // E-Scio. 2019. № 7(34). С. 67 – 72.

6. Юрганов А.А. Сентимент-анализ как инструмент исследования текстов // Проблемы Науки. 2017. № 29 (111). С. 39 – 41.

7. Ververidis D., Kotropoulos C. Emotional speech recognition: Resources, features, and method // Speech Communication. 2006. № 48 (9). P. 1162–1181.

8. Бредихин А. И. Алгоритмы обучения сверточных нейронных сетей // Вестник ЮГУ. 2019. № 1 (52). С. 41-54.

9. Nassif A. B., Shahin I., Attili I., Azzeh M., Shaalan K. Speech recognition using deep neural networks: a systematic review // IEEE Access. 2019. № 7. Pp. 19143 – 19165. DOI:10.1109/access.2019.2896880

10. Huang X., Acero A. Spoken language processing: a guide to theory, algorithm, and system development. Prentice Hall, 2001. 1008 p.

11. Тампель И. Б. Автоматическое распознавание речи – основные этапы за 50 лет // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. № 15(6). С. 957 – 968.

12. Алексеев И. В., Митрохин М. А. Современные методы распознавания речи для построения голосового интерфейса управления системами специального назначения // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 2 (50). С. 3 – 10.

13. Sapakova B. S., Sarsembayev A. A. Overview of Emotion Classification Methods Using Deep Learning for Audio Data // Science and Business: Ways of Development. 2023. № 5(143). Pp. 41-47.

14. Ливингстон С.Р. RAVDESS – датасет для распознавания эмоций по записи голоса // PLOS ONE. 2018. № 1 / 35. 10.1371/journal.pone.0196391.

15. Болдышев А.В., Медведева А.А., Прохоренко Е.И., Гайворонская Д.И. Построение спектрограмм звуковых сигналов на основе субполосных представлений // Экономика. Информатика. 2024. № 51(1). С. 250 – 260. DOI10.52575/2687-0932-2024-51-1-250-260

16. Столбов М. Б., Иванов В. Л. Анализ и модели речевых сигналов. СПб.: НИУ ИТМО. 2024. 97 с.

17. Горбунова Е.С. Методы проектирования искусственных интеллектуальных систем распознавания эмоций на основе нейросетей // Теория и практика современной науки. 2016. № 11. С. 221 – 226.

18. Lecun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-based learning applied to document recognition // Proceedings of the IEEE. 1998. № 86(11). Pp. 2278–2324.

19. Аксёнов О. Д. Метод мел-частотных кепстральных коэффициентов в задаче распознавания речи // Электронные системы и технологии: 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г.: сборник тезисов докладов. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Минск. 2019. С. 45 – 46.

20. Ермаков С. А., Ермакова Л. М. Методы оценки эмоциональной окраски текста // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика, 2012. № 1. С. 85 – 90.

Рудакова Полина Андреевна, аспирант, swinol.polina1998@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Семенов Тимофей Александрович, студент, semenov.timofeisemyonov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сычугов Алексей Алексеевич, д-р техн. наук, директор института прикладной математики и компьютерных наук, xru2003@list.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Котов Владислав Викторович, д-р техн. наук, профессор, vkotov@list.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DETERMINING THE LEVEL OF CUSTOMER SATISFACTION BASED ON MACHINE LEARNING IN CALL-CENTERS

P.A. Rudakova, T.A. Semenov, A.A. Sychugov, V.V. Kotov

The article pays special attention to the formalization of the problem of assessing customer satisfaction, analysis of various approaches to solving it using machine learning and speech analytics, as well as their applicability. The purpose of this article is to study and evaluate the potential of using modern technologies of machine learning and emotion analysis in speech to determine the level of customer satisfaction in call centers. It is emphasized that the task of analyzing the emotional coloring and content of speech includes the development and training of a model that can interpret speech data and convert them into metrics that correlate with customer satisfaction. To train the model, we used a dataset made up of various conversation recordings and corresponding text transcriptions. The final part of the article is devoted to choosing the most suitable method, building a model and its application on a data set to demonstrate the effectiveness of the proposed approach. As a result, it was revealed that the models demonstrated a good ability to recognize emotional coloring and adequately predict the level of customer satisfaction. The authors concluded that the integration of emotion and sentiment analysis allows for a more accurate assessment of customer perceptions of services.

Key words: machine learning technology, customer satisfaction, convolutional neural networks, mel-cepstral coefficients, speech recognition technologies, fully connected neural network.

Rudakova Polina Andreevna, postgraduate, swinol.polina1998@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Semenov Timofey Alexandrovich, student, semenov.timofeisemyonov@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Sychugov Alexey Alexeevich, doctor of technical sciences, director of the institute of applied mathematics and computer science, xru2003@list.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kotov Vladislav Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, vkotov@list.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.021
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-352-353

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПОГОДНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОКРУЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ

Ю.А. Леонов, Р.А. Филиппов, Г.В. Царева, А.А. Курдин

В данной статье рассматриваются модели и методы анализа погодных изменений под воздействием окружающих факторов. Прогнозирование погоды начинается с наблюдения за текущим состоянием атмосферы и знания основных погодных параметров, таких как температура, давление, влажность, ветер, осадки и так далее. Для их измерения используются метеостанции, которые могут быть как обслуживаемыми, так и полностью автоматизированными. Прогнозирование погоды является наиболее развитой областью метеорологии. Выделяют три основных метода прогнозирования: синоптический, численный и статистический. Цель данной статьи заключается в исследовании моделей и методов анализа погодных изменений, под воздействием окружающими факторами.

Ключевые слова: прогноз погоды, атмосферные параметры, метеостанции, синоптическое прогнозирование, численные методы, статистическое прогнозирование, автоматизированные системы.

Введение. В современных условиях прогнозирование погоды остается сложным и актуальным вызовом для научного сообщества и общества в целом. Несмотря на наличие обширных данных от метеостанций и разнообразных методов прогнозирования, точность прогнозов под воздействием окружающих факторов остается недостаточной. Проблема заключается не только в повышении точности прогнозов, но и в эффективном анализе погодных изменений с учетом сложных взаимосвязей между различными атмосферными параметрами.

Одним из ключевых аспектов является ограниченное количество метеостанций в различных регионах и их неравномерное распределение. Это влияет на точность и полноту данных, что приводит к ограничениям в предсказании погоды в некоторых областях. Кроме того, существующие методы прогнозирования могут быть недостаточно адаптированы к сложным изменениям в атмосфере, вызванным внешними воздействиями.

Проблема также заключается в необходимости более эффективного использования современных технологий, включая методы машинного обучения, для анализа обширных объемов данных и повышения точности прогнозов. В среднем, точность прогноза для краткосрочных периодов (несколько дней вперед) может достигать 90% и выше. Однако для долгосрочных прогнозов точность может снижаться, особенно при попытке предсказания погодных изменений на более длительные периоды. Недостаток систем, способных в реальном времени адаптироваться к динамике погоды и учитывать окружающие факторы, представляет собой значительное ограничение в сфере прогнозирования погоды.

Таким образом, проблемой, требующей внимания и решения, является не только улучшение методов прогнозирования, но и разработка современных систем, способных более эффективно анализировать погодные изменения под воздействием окружающих факторов, что потенциально приведет к более точным и адаптивным прогнозам в различных регионах.

Теоретический анализ. Существует три основных подхода к прогнозированию погоды: синоптические, численные и статистические методы. Каждый из них представляет собой уникальный подход к анализу атмосферных процессов и предсказанию будущих изменений. Рассмотрим, в чем заключается их различия, с целью выбора, наиболее подходящего для последующего анализа.

Синоптический метод. Описание: Синоптический метод прогнозирования основан на наблюдении за текущими атмосферными условиями и их интерпретации с использованием синоптических карт [1]. Синоптики анализируют распределение атмосферных параметров, таких как давление, температура, влажность, ветер, и на основе этого делают выводы о будущих изменениях погоды.

Принцип работы: Синоптики используют метеорологические карты, на которых отображаются изобары (линии равного давления) и другие линии, представляющие различные атмосферные параметры. Они ищут паттерны и корреляции между различными элементами карты для предсказания движения циклонов, антициклонов и других атмосферных явлений.

Численный (гидродинамический) метод. Описание: Численный метод прогнозирования основан на математических моделях, описывающих движение атмосферы [2]. Эти модели решают систему уравнений гидродинамики, учитывая множество параметров и начальные условия. Результаты численных вычислений предсказывают состояние атмосферы в будущем.

Принцип работы: Модели численного прогнозирования используют компьютерные алгоритмы для решения уравнений, описывающих физические процессы в атмосфере. Они разбивают атмосферу на трехмерную сетку и обновляют значения параметров на каждом шаге по времени.

Статистический метод. Описание: Статистический метод прогнозирования основан на анализе статистических связей между текущими и прошлыми атмосферными условиями и будущими изменениями погоды [3]. Модели строятся на основе статистических закономерностей, выявленных из исторических данных.

Принцип работы: Статистические модели используют методы регрессии, корреляции и другие статистические методы для анализа данных. Они могут использовать информацию о том, какие атмосферные условия в прошлом приводили к определенным изменениям погоды, чтобы делать предсказания для будущих событий.

После проведенного анализа был выделен синоптический метод прогнозирования, в качестве наилучшего варианта.

Также после анализа предметной области были выделены следующие критерии, по которым будет производиться прогнозирование погодных изменений.

Критерии:
дата и время полученных данных;
вид облаков;
тип осадков;
температура;
кажущаяся температура;
влажность;
скорость ветра;
направление ветра;
видимость;
облачное покрытие;
давление;
прогноз.

Разработана структура данных (табл. 1). Каждый из вышеперечисленных критериев имеет несколько вариантов ответа. Каждому варианту ответа соответствует своё значение.

Таблица 1

Метеорологические данные

	Критерий	Значения
1	Дата и время	Год, месяц, число, время.
2	Вид облаков	27 уникальных текстовых значений, таких как: переменная облачность, преимущественно облачно, пасмурно и т.д.
3	Тип осадков	Дождь, снег.
4	Температура	Числовое значение (градусы Цельсия).
5	Кажущаяся температура	Числовое значение (градусы Цельсия).
6	Влажность	Числовое значение (проценты).
7	Скорость ветра	Числовое значение (км/ч).
8	Направление ветра	Числовое значение (градусы).
9	Видимость	Числовое значение (километры).
10	Облачное покрытие	Числовое значение.
11	Давление	Числовое значение (миллиметры ртутного столба).
12	Прогноз	215 уникальных текстовых значений, таких как: пасмурно в течение всего дня, ночь туманная, переменная облачность до ночи и т.д.

В результате анализа сайта kaggle.com, на наличие информации о предметной области, был выбран набор данных, основанный на погодных параметрах с 2006 по 2016 г., содержит в себе 96 тыс. записей и состоит из 12 характеристик. Данные характеристики представляют собой числовые, строковые и временные значения на рисунке 1 и 2.

Дата и время	Вид облаков	Тип осадков	Температура	Кажущаяся температура	Влажность	Скорость ветра
2006-04-01 00:00:00.000 +0200	Partly Cloudy	rain	9.47	7.39	0.89	14.12
2006-04-01 01:00:00.000 +0200	Partly Cloudy	rain	9.36	7.23	0.86	14.26
2006-04-01 02:00:00.000 +0200	Mostly Cloudy	rain	9.38	9.38	0.89	3.93
2006-04-01 03:00:00.000 +0200	Partly Cloudy	rain	8.29	5.94	0.83	14.10
2006-04-01 04:00:00.000 +0200	Mostly Cloudy	rain	8.76	6.98	0.83	11.04
2006-04-01 05:00:00.000 +0200	Partly Cloudy	rain	9.22	7.11	0.85	13.96
2006-04-01 06:00:00.000 +0200	Partly Cloudy	rain	7.73	5.52	0.95	12.36

Рис. 1. Первая часть фрагмента данных

Направление ветра	Видимость	Облачное покрытие	Давление	Прогноз
251	15.826	0	1015.13	Partly cloudy throughout the day.
259	15.826	0	1015.63	Partly cloudy throughout the day.
204	14.957	0	1015.94	Partly cloudy throughout the day.
269	15.826	0	1016.41	Partly cloudy throughout the day.
259	15.826	0	1016.51	Partly cloudy throughout the day.
258	14.957	0	1016.66	Partly cloudy throughout the day.
259	9.982	0	1016.72	Partly cloudy throughout the day.

Рис. 2. Вторая часть фрагмента данных

1) На этапе первичного исследования данных был проведен анализ предметной области, в результате которого было выяснено, какие параметры зависят больше друг от друга, а также определены главные поля, по которым будет проводится анализ.

2) Обработка и анализ были проведены в открытой среде Google Colab с помощью языка программирования Python [4]. Основным инструментом аналитики стала библиотека sklearn, которая предоставляет большое разнообразие методов для анализа данных.

3) Также была проведена очистка набора данных от выбросов и нулевых значений. Обработка включала в себя следующие этапы:

4) Замена нулевых значений в категориальных признаках и удаления нулевых строк представлена на рисунке 3.

```
df.set_axis(col_name, axis = "columns", inplace = True)
df.dropna()
df = df.drop_duplicates().reset_index(drop=True)
df.duplicated().sum()
```

Рис. 3. Замена нулевых значений и удаление

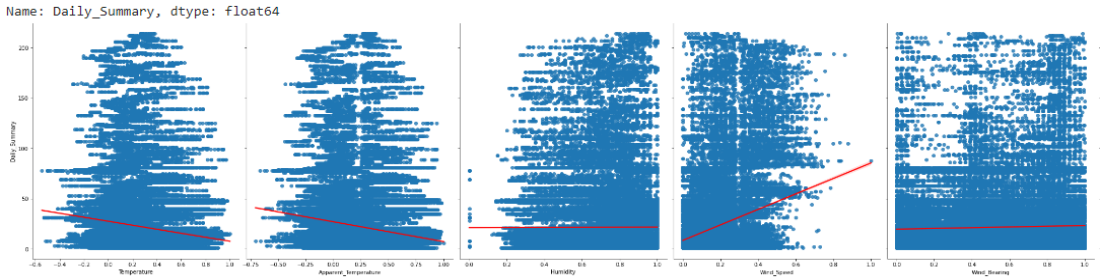
Все строки и столбцы были проверены на дублирование и отсутствия значений. В обоих случаях удалялись либо найденный дубликат, либо строка с отсутствующим значением.

5) Вывод информации о данных и переименование столбцов представлен на рисунке 4. К выбросам были отнесены следующие данные:

```
df=pd.read_excel("random_weather_class.xlsx")
df.head()
df.info()
col_name = ['Sumary', 'Precip_Type', 'Temperature', 'Apparent_Temperature',
'Humidity', , 'Wind_Speed' , 'Wind_Bearing' , 'Visibility' , 'Pressure',
'Daily_Summary']
```

Рис. 4. Переименование столбцов

Был проведен анализ линейной регрессии. Проведение анализа в рассматриваемом наборе данных производится относительно ключевого поля «Прогноз». С помощью корреляционного анализа была установлена зависимость от этого поля, представленная на рисунке 5.



```
Name: Daily_Summary, dtype: float64
Mean Absolute Error: 19.544552997437265
Mean Squared Error: 933.4087288885914
Root Mean Squared Error: 30.551738557545157
Accuracy on training set:0.165
Accuracy on test set:0.167
Уравнение: y = x1 * 119.101 + x2 * 5.087 + x3 * 10.604 + x4 * -24.181 + x5 * -14.772 + x6 * 59.297 + x7 * 1.980 + x8 * -5.124 + x9 * -17.133
['Summary' 'Precip_Type' 'Temperature' 'Apparent_Temperature' 'Humidity'
 'Wind_Speed' 'Wind_Bearing' 'Visibility' 'Pressure']
```

Рис. 5. Результат анализа с полем «Прогноз»

Перед началом создания и обучения моделей начальные данные были разбиты на обучающую и тестовую выборку случайным образом. Обучающая выборка составляет 80% от исходной и используется для обучения моделей. Оставшаяся часть используется для оценки эффективности созданных моделей.

Структура нейронной сети имеет 2 скрытых слоя. В качестве основной функции активации используется гиперболический тангенс:

$$tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)}, \quad (1)$$

где *x* - взвешенную сумму входных значений для конкретного нейрона.

На выходном слое используется функция активации производная гиперболического тангенса:

$$tanh(x) = 1 - tanh^2(x), \quad (2)$$

Разработка структуры нейронной сети

Многослойный перцептрон. Данный модуль реализован на языке программирования Python, с помощью библиотеки *sklearn* и соответствующих классов для реализации используемых формализованных методов. Результата работы нейронной сети на языке Python (рис. 6).

На языке программирования C# загрузка происходит из csv файла, полученные данные хранятся в *List<double>* и *List<double[]>*[5].

Нейронная сеть была декомпозирована на несколько классов:

• *Layer* – класс описывающий скрытый слой нейронной сети;

• *Neuron* – класс описывающий нейрон;

• *NeuronType* – перечисление, хранящее в себе статус объекта нейрона (нейроны входного и выходного слоя);

• *Topology* – класс, описывающий настройки нейронной сети (количество слоев, нейронов, эпох и точность обучения);

• *NeuralNetwork* – класс, хранящий в себе узлы и настройки нейронной сети, и имеющий реализацию обучения и прогнозирования на основе входного набора данных.

В результате обучения, полученная точность составляет 70 % (рис. 7).

145	0.00	0.00	0.00	1
146	0.00	0.00	0.00	12
147	0.00	0.00	0.00	5
148	0.00	0.00	0.00	5
150	0.00	0.00	0.00	3
153	0.00	0.00	0.00	1
accuracy			0.73	19291
macro avg	0.69	0.70	0.62	19291
weighted avg	0.71	0.73	0.95	19291

Рис. 6. Точность нейронной сети на Python

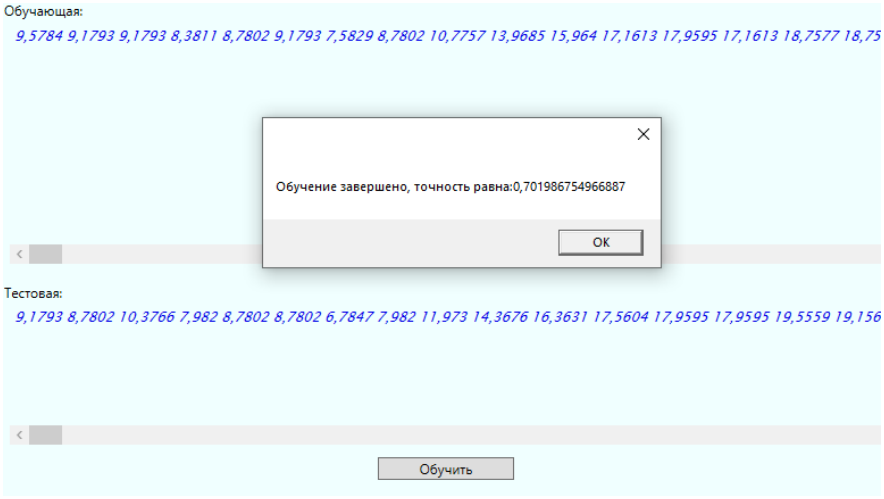


Рис. 7. Точность нейронной сети на языке c#

Результаты и их обсуждение. Обучение проводилось с заданными параметрами. Слои представлены в виде 10, 8, 4, 1, скорость обучения 0.001, количество эпох равно 20. Время выполнения полного обучения на языке C# с текущими параметрами равняется 2 минуты, в то время как обучение с теми же параметрами на языке Python равняется 6 секунд. Точность обучения на обоих языках приблизительно равна 70% (C#), 73% (Python). Также в результате работы были обнаружены преимущества языка Python в скорость чтения, отображения данных и создания самой программы. Исходя из вышеперечисленных данных можно сделать вывод, что с текущей задачей лучше справится язык программирования Python. Статистический анализ результатов обучения нейронной сети с выбранными параметрами оказался достаточно точным и информативным.

Заключение. В рамках проведенного исследования был выполнен обзор и сравнительный анализ основных моделей и методов, применяемых для прогнозирования погодных изменений с учетом влияния внешних факторов окружающей среды.

Были рассмотрены три подхода к прогнозированию: синоптический, основанный на анализе текущего состояния атмосферы, численный, использующий компьютерное моделирование физических процессов, и статистический, базирующийся на выявлении закономерностей в исторических данных.

Для практической реализации прогнозирования был выбран статистический подход как наиболее гибкий и позволяющий учитывать различные факторы окружающей среды. Были определены основные критерии и структура входных данных на основе реального набора погодных параметров.

Для прогнозирования погоды по имеющимся данным были разработаны нейронные сети с использованием языков программирования Python и C#. Экспериментальное тестирование продемонстрировало более высокую эффективность нейросетевой модели на Python для решения поставленной задачи прогнозирования.

Полученные в исследовании результаты свидетельствуют о перспективности применения статистических и нейросетевых алгоритмов для анализа и моделирования сложных погодных явлений с учетом многофакторных воздействий. Разработанные модели могут быть положены в основу автоматизированных систем мониторинга, прогнозирования и раннего предупреждения опасных погодных условий.

Список литературы

1. Методы географического прогнозирования. [Электронный ресурс] URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-geograficheskogo-prognozirovaniya (дата обращения: 10.05.2024).
2. Численные методы прогноза погоды. [Электронный ресурс] URL: https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/special/BelovBorPanin.pdf (дата обращения: 10.01.2024).
3. Методы прогнозирования погоды. [Электронный ресурс] URL: https://geo.bsu.by/images/pres/oz/metprogn/metprogn_1.pdf (дата обращения: 10.01.2024).
4. Соков И.А. Быстродействие обучения нейронной сети в реальном времени на python // ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет». Тольятти, 2022. С. 79-80.
5. Ларина В.А. Разработка нейронной сети на объектно-ориентированном языке программирования c# // Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. Тольятти, 2021. С. 82-85.
6. Багдади М.А. Обзор возможностей и сравнение языков программирования python и r в области анализа данных / М.А. Багдади, Б.А. Мархабаев // Инновационные механизмы управления цифровой и региональной экономикой. Москва, 2023. С. 282-294.

7. Технология трехмерного моделирования и текстурирования объектов в Blender 3d и 3d Max : Учебное пособие / А. А. Кузьменко, А. Д. Гладченков, В. А. Шкаберин [и др.]. Москва: ООО "ФЛИНТА", 2019. 142 с. EDN YWRBTT.

8. Kuzmenko A.A. Neural Network Analysis of Ecological and Floristic Classification as a Basis for Protection of Regional Biodiversity / A. A. Kuzmenko, A. V. Averchenkov, A. S. Sazonova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". Vol. 753, 4, Chapter 3. Vladivostok: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 042029. DOI 10.1088/1757-899X/753/4/042029. EDN EAYYPM.

9. Sazonova A.S. Calculation of a Complex Indicator of the Innovation Potential / A. S. Sazonova, A. A. Kuzmenko, M. V. Terekhov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". Vol. 753, 4, Chapter 3. Vladivostok: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 042028. DOI 10.1088/1757-899X/753/4/042028. EDN UVCPYJ.

10. Development and study of the model for epidemic spread / A. V. Ivanova, A. S. Sazonova, A. A. Kuzmenko, L. B. Filippova // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021). Vol. 2899. Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. P. 9-16. DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-9-16. EDN XTBWGO.

Леонов Юрий Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, yorleon@yandex.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Филиппов Родион Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, redfil@mail.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Царева Галина Вячеславовна, канд. пед. наук, доцент, заведующий кафедрой, tzareva9773@mail.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Курдин Артем Алексеевич, студент, libv88@yandex.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет

MODELS AND METHODS FOR ANALYZING WEATHER CHANGES UNDER THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL FACTORS

Yu.A. Leonov, R.A. Filippov, G.V. Tsareva, A.A. Kurdin

This article discusses models and methods for analyzing weather changes under the influence of environmental factors. Weather forecasting begins with observing the current state of the atmosphere and knowing the main weather parameters such as temperature, pressure, humidity, wind, precipitation, and so on. To measure them, weather stations are used, which can be either serviced or fully automated. Weather forecasting is the most developed field of meteorology. There are three main forecasting methods: synoptic, numerical and statistical. The purpose of this article is to study models and methods for analyzing weather changes influenced by environmental factors.

Key words: weather forecast, atmospheric parameters, weather stations, synoptic forecasting, numerical methods, statistical forecasting, automated systems.

Leonov Yuri Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, yorleon@yandex.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Filippov Rodion Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, redfil@mail.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Tsareva Galina Vyacheslavovna, candidate of pedagogical sciences, docent, head of the department, tzareva9773@mail.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Kurdin Artyom Alekseevich, student, libv88@yandex.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-357-358

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА ПОДПОРНЫХ СТЕН МЕТОДОМ БУРОСЕКУЩИХ СВАЙ

Д.В. Топчий, З.Х. Чипова

Данная научная статья посвящена исследованию особенностей технологии устройства подпорных стен методом буросекущих свай, которая на сегодняшний день является одной из самых востребованных в строительстве подземных и инженерных сооружений. Технология буросекущих свай заключается в последовательном бурении и бетонировании свай, частично пересекающихся друг с другом, что позволяет создавать прочные и герметичные конструкции. В статье детально рассматриваются ключевые этапы выполнения работ, начиная от геодезической подготовки участка и заканчивая процессом пересечения свай. Особое внимание уделено преимуществам данной технологии, таким как высокая несущая способность, минимизация вибраций и шума, а также возможность применения в условиях плотной городской застройки и сложных геологических условий. Описаны ограничения метода, включая высокие затраты и сложности при работе в плотных или каменистых грунтах. Кроме того, обсуждаются перспективы дальнейшего развития технологии, включая автоматизацию процессов и внедрение экологически чистых материалов.

Ключевые слова: буросекущие сваи, подпорные стены, грунтовые условия, геотехника, свайные конструкции, несущая способность.

Метод буросекущих свай представляет собой технологию возведения свайных стен путем последовательного бурения и бетонирования свай, которые частично пересекаются друг с другом. Этот процесс позволяет создать сплошную стену, обеспечивающую прочность и устойчивость даже в сложных грунтовых условиях. Диаметр свай, их глубина и степень пересечения определяются в зависимости от геологических условий и требований проекта.

Буросекущие сваи являются модифицированной версией буронабивных свай (БНС). Чтобы разобраться в различиях этих разновидностей буровых опор в таблице приведены основные характеристики этих свай.

Таблица 1

Различие буровых опор

Виды буровых свай	Расстояние между сваями	Армирование	Расположение	Основное примечание
Буросекущие (БСС)	Сплошная стенка с частичным перекрытием соседних опор	Поочередное армирование, через одну сваю	По периметру	Ограждение котлованов, укрепление грунтовых откосов
Буронабивные (БНС)	С интервалом	Каждая свая	По периметру и под отдельными несущими конструкциями	Опоры под фундаменты

Технологический процесс возведения стен методом буросекущих свай включает несколько ключевых этапов:

1. Подготовительные работы. На участке под застройку проводятся инженерно-геологические изыскания с составлением отчета о типе, категории грунтов, уровня залегания грунтовых вод, степени их агрессивности. На основании полученных данных разрабатывается проект, в котором определяются расчетные характеристики буросекущих свай.

2. Разметочные работы. Особенность устройства стены в грунте заключается в том, что армирующие каркасы буросекущих свай размещают не в каждой скважине, а через одну опору. Чтобы понять тонкость такой установки, рекомендуется пронумеровать все сваи по порядку. Разметку мест бурения скважины проводят по прямой линии, на которой будут устанавливаться опоры на расчетном расстоянии.

3. Процесс бурения начинается с погружения в грунт обсадной трубы. Вращательный шнек и обсадная труба, вращаясь в разные стороны, погружаются в грунтовый массив. Продвижение обсадной трубы производится с небольшим опережением, чтобы исключить попадания подземных вод в трубную полость.

4. Последовательность бурения скважин. В начале производится бурение скважин для свай №1,3,5. После того, как первая и третья скважины пробурены, начинаются бурильные работы второй скважины, расположенной на второй линии между первым и третьим номером опор.

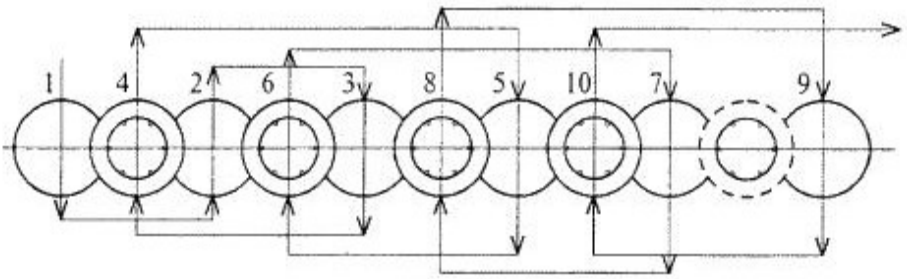


Рис. 1. Последовательность формирования буросекущих опор

5. Для формирования буросекущих свай четного порядка, по всей внутренней поверхности скважин устанавливаются пространственные арматурные каркасы, выполненные из стальной арматуры. Расчет диаметра арматурных стержней, их количество и шаг установки производится на стадии проектирования.

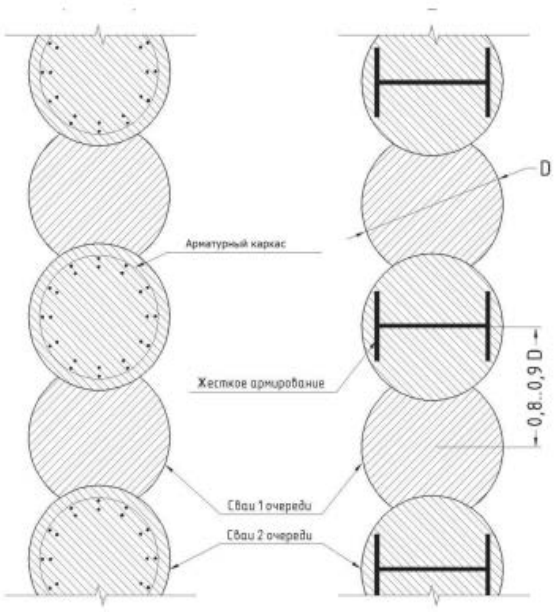


Рис. 1. Буросекущие сваи, схема армирования

6. Бетонирование. Заполнение скважины бетоном производится поэтапно: вначале бетонируются скважины № 1 и № 3, а затем свая с арматурой № 2.

Технология буросекущих свай обладает рядом значительных преимуществ по сравнению с традиционными методами устройства подпорных стен. В первую очередь, это минимизация вибраций – в процессе бурения практически отсутствуют вибрации, что делает метод подходящим для использования в условиях плотной городской застройки. Также высокая несущая способность- свайные конструкции обладают высокой несущей способностью, что позволяет возводить их на различных типах грунтов, включая сложные и слабые грунты. Также обладают герметичностью конструкции - за счет пересечения свай обеспечивается герметичность конструкции, что особенно важно при работе в условиях высокого уровня грунтовых вод. Гибкость конструкции - конфигурация и параметры сваи могут быть адаптированы к условиям конкретного проекта, что делает технологию универсальной. И минимум шума - процесс бурения менее шумный по сравнению с забивкой свай, что особенно важно при работе в черте города

Несмотря на очевидные преимущества, технология буросекущих свай имеет ряд ограничений:

- высокая стоимость. Буросекущие сваи требуют применения специализированной техники и квалифицированного персонала, что увеличивает стоимость проекта.

- сложность выполнения работ в плотных грунтах. В условиях чрезвычайно плотных или каменистых грунтов бурение может вызывать дополнительные технические сложности, увеличивая время и стоимость строительства.

- необходимость точной геодезической подготовки. Технология требует высокой точности при разметке и бурении, что связано с необходимостью точного пересечения свай для обеспечения сплошности стены.

Технология буросекущих свай широко применяется для укрепления склонов и откосов. Метод позволяет надежно закрепить нестабильные склоны, предотвращая эрозию и оползни. А также при возведении глубоких котлованов, особенно в условиях городской застройки, буросекущие сваи эффективно удерживают грунт и предотвращают его обрушение. В условиях плотной застройки буросекущие сваи являются оптимальным решением благодаря минимальному воздействию на окружающую среду. И при работе в условиях высокого уровня грунтовых вод технология обеспечивает надежную защиту от проникновения воды, что делает её эффективной при строительстве подземных сооружений.

С развитием технологий наблюдаются улучшения в методах бурения и армирования, что позволяет снизить затраты и повысить его эффективность. Например, всё больше используются методы автоматизированного контроля качества бурения и бетонирования, что снижает вероятность ошибок и ускоряет процесс возведения стен.

Кроме того, особое внимание уделяется экологическим аспектам технологии, включая использование малошумных и энергоэффективных буровых установок, а также внедрение экологичных материалов для бетонирования.

Заключение и выводы. Технология буросекущих свай представляет собой эффективное решение для устройства подпорных стен в сложных геологических условиях. Несмотря на высокие затраты и необходимость применения специализированного оборудования, метод имеет значительные преимущества, включая минимальное воздействие на окружающую среду, высокую прочность и герметичность конструкции. Технология продолжает развиваться, предлагая всё более инновационные решения для строительства сложных объектов.

Список литературы

1. «СП 381.1325800.2018. Свод правил. Сооружения подпорные. Правила проектирования». М., 2018.

2. Ананьино О.К., Шевченко И.С., Лапидус А.А. Формирование организационно-технологических аспектов научно-технического сопровождения проектирования и строительства зданий с заглублением подземной части полностью или частично ниже планировочной отметки земли более чем на 15 м.// Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11. № 5. С. 39.

3. Бидов Т.Х., Ковалева С.А., Магомедов М.И. Перспективы формирования методики по повышению эффективности возведения зданий и сооружений из трубобетонных конструкций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 120-126.

4. Лапидус А.А., Бидов Т.Х., Лоткин В.С. Особенности организации строительства при комплексном развитии городских территорий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 238-242.

5. Мухин М.С. Использование заглубленных железобетонных конструкций повышенной несущей способности с целью обеспечения надежной эксплуатации существующих объектов.//Инновационные технологии в инженерных системах. Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции. Чебоксары, 2024. С. 136-147.

6. Панфилов Д.В., Золотухин С.Н., Стукалин А.А. Укрепление аварийного склона железобетонными конструкциями повторного применения // Научный журнал строительства и архитектуры. 2024. № 3 (75). С. 35-46.

7. Топчий Д.В., Токарский А.Я. Концепция контроля качества организации строительных процессов при проведении строительного надзора на основе использования информационных технологий // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11. № 3. С. 49.

8. Топчий Д.В., Кочурина Е.О. Повышение эффективности организационно-технологических моделей производства работ в условиях стесненной городской среды путем снижения воздействия на подземные сооружения // Перспективы науки. 2018. № 1 (100). С. 31-36.

9. Топчий Д.В., Чипова З.Х. Технологические особенности устройства подпорных стен // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 151-154.

Топчий Дмитрий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, TopchiyDV@mgsu.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Чипова Зарина Хусеновна, преподаватель, zara4_2011@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

FEATURES OF THE TECHNOLOGY OF CONSTRUCTING RETAINING WALLS BY THE METHOD OF BORED SECANT PILES

D.V. Topchiy, Z.Kh. Chipova

This scientific article is devoted to the study of the features of the technology of constructing retaining walls by the method of bored secant piles, which is currently one of the most popular in the construction of underground and engineering structures. The technology of bored secant piles consists of sequential drilling and concreting of piles, partially intersecting each other, which allows creating strong and sealed structures. The article examines in detail the key stages of the work, starting from geodetic preparation of the site and ending with the process of crossing piles. Particular attention is paid to the advantages of this technology, such as high bearing capacity, minimization of vibrations and noise, as well as the possibility of application in dense urban areas and complex geological conditions. The limitations of the method are described, including high costs and difficulties when working in dense or rocky soils. In addition, the prospects for further development of the technology, including automation of processes and the introduction of environmentally friendly materials, are discussed.

Key words: bored piles, retaining walls, soil conditions, geotechnics, pile structures, bearing capacity.

Topchy Dmitry Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, TopchiyDV@mgsu.ru, Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering,

Chepova Zarina Huseynovna, teacher, zara4_2011@mail.ru, Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering

УДК 303.732
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-359-360

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ УПРАВЛЕНИЯ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНЫМ ЦЕХОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.С. Путенихина, И.Е. Ильин, Ю.А. Извеков, В.В. Шеметова

В данной статье анализируется система управления кислородно-конвертерного цеха металлургического предприятия, предлагаются методы ее усовершенствования, которые в будущем позволят оценить эффективность, качество и надежность функционирования такой системы управления. Анализ и предложенный комплексный подход к совершенствованию системы управления металлургических производств предполагает повышение общей эффективности управления, улучшение качества продукции и обеспечению надежности функционирования производственных систем, а также получению прибыли.

Ключевые слова: металлургическое предприятие, кислородно-конвертерный цех, система управления, эффективность, качество, надежность, методы, алгоритмы.

Одной из наиболее актуальных проблем является развитие новых и адаптация существующих методов управления промышленными многоуровневыми металлургическими компаниями. Вне зависимости от масштабов производственной деятельности, технологических особенностей, вида собственности, лишь рациональные и эффек-

тивное управление позволит промышленной многоуровневой металлургической компании получить наилучший результат в процессе своей деятельности.

Металлургические предприятия входят в число тех, которые наиболее нуждаются в новых методах и алгоритмах управления всеми технологическими процессами. Это напрямую связано с требованиями к непрерывности, а также нежелательного участия человека при выполнении многих операций. Управление металлургических производств представляет собой совокупность определенных технологий, за счет которых осуществляется управление производственными процессами с минимальным привлечением к ним человеческого ресурса, путем использования новых и или усовершенствования имеющихся методов и алгоритмов управления с целью оценки эффективности, качества, надежности функционирования системы управления металлургического предприятия. Такое управление технологическими процессами металлургического производства позволяет оптимально перераспределить энергетические, материальные и информационные возможности, что способствует, в том числе в некоторых случаях, замещению физического труда.

Целью данной статьи являются анализ, изучение и оценка внедрения новых методов и алгоритмов управления металлургическими производствами с целью оценки эффективности, качества и надежности функционирования системы управления кислородно-конвертерного цеха.

Такая постановка задачи позволит анализировать и усовершенствовать операционные процессы, повысит производительность и обеспечит стабильное, надежное функционирование производственных систем.

Кислородно-конвертерные цеха являются ключевыми элементами металлургических предприятий, обеспечивая производство высококачественной стали. Эффективное управление такими цехами требует комплексного подхода, включающего оценку различных аспектов их функционирования [1-3].



Рис. 1. Основные команды и обязанности в цехе

Кислородно-конвертерный цех имеет в своем составе: три конвертера, мостовой кран с магнитом, мостовой кран с клещевым захватом, два мостовых крана для ковшей с чугуном, два мостовых крана для совков со скрапом, два мостовых крана для пустых сталь-ковшей (грузоподъемность 200 т), четыре мостовых крана для сталь-ковшей (грузоподъемность 500 т) на линии машин непрерывного литья заготовок и здесь же еще четыре мостовых крана для промышленных ковшей и шлак-ковшей. Имеется 16 мостовых кранов [4-7].

Кислородно-конвертерный способ производства стали является доминирующей технологией в металлургической промышленности. Этот метод позволяет эффективно перерабатывать жидкий чугун и стальной лом, обеспечивая высокое качество продукции при меньших энергетических затратах [8, 9].

Кислородно-конвертерный процесс включает несколько ключевых этапов [10].

1. Загрузка металлического лома: металлический лом загружается в конвертер.

2. Продувка ванны кислородом: чистый кислород (больше 99,5 %) подается под высоким давлением для окисления углерода и кремния.

3. Выделение тепла: окисление углерода и кремния приводит к выделению большого количества тепла, которое расплавляет металлический лом.

4. Образование шлаков: образуются основные шлаки, необходимые для удаления фосфора и серы из расплава.

5. Разливка стали: расплавленная сталь направляется на машину непрерывного литья заготовок для затвердевания.

В центре системы управления кислородно-конвертерным цехом стоит начальник цеха. Он отвечает за общее руководство и координацию всех производственных процессов (рис. 1).

Для оценки эффективности системы управления кислородно-конвертерного цеха можно использовать основные показатели, представленные на рис. 2.

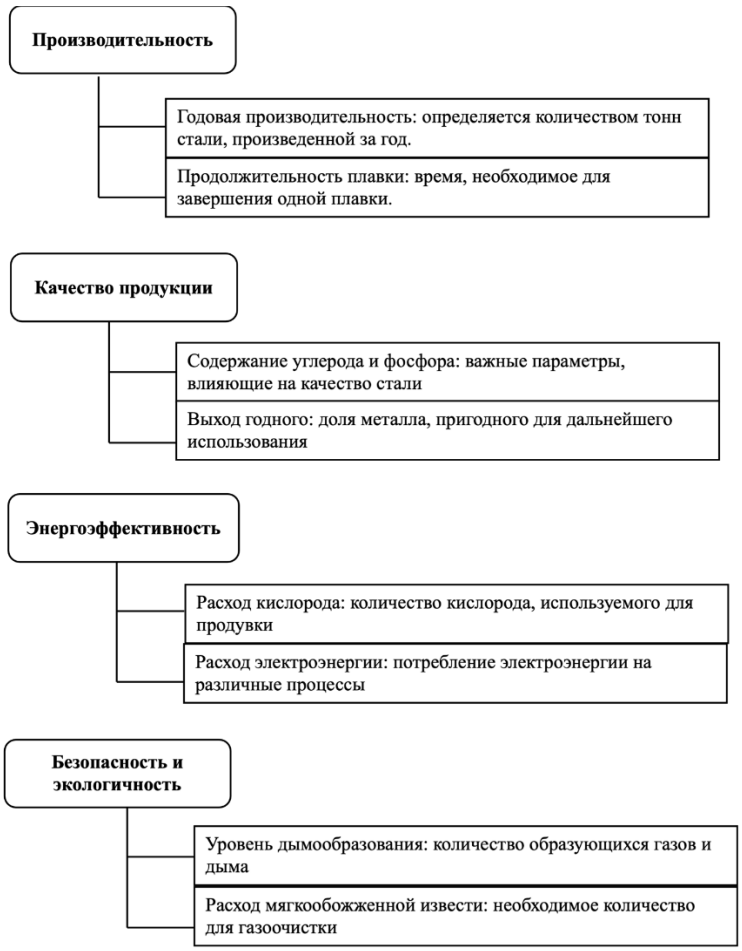


Рис. 2. Основные показатели оценки эффективности системы управления кислородно-конвертерного цеха

Для оценки эффективности системы управления кислородно-конвертерного цеха будем использовать следующие методы.

1. Анализ производственных данных:

- сбор и анализ данных о производительности, качестве продукции, энергопотреблении и других ключевых показателях;
- использование статистических методов для выявления тенденций и закономерностей.

2. Моделирование процессов:

- создание математических моделей для прогнозирования производительности и качества продукции;
- использование компьютерных симуляций для оптимизации процессов.

3. Оценка рисков:

- анализ возможных рисков и их влияния на производственные процессы;
- разработка мер по снижению рисков и повышению надежности системы [11-15].

4. Автоматизация и управление данными:

- внедрение систем автоматического управления и сбора данных, компьютерного зрения, систем искусственного интеллекта [16];

- использование программного обеспечения для мониторинга и анализа данных в реальном времени [17].

Для улучшения эффективности функционирования системы управления кислородно-конвертерного цеха необходимо внести следующие изменения.

1. Внедрение в существующие системы управления инноваций:

- использование программного обеспечения для мониторинга и анализа данных в реальном времени;
- математическое моделирование процесса управления, построение цифрового двойника [18].

2. Автоматизация и управление данными:

- внедрение систем автоматического управления и сбора данных для повышения точности и оперативности принятия решений;
- использование программного обеспечения для анализа и прогнозирования производственных данных.

3. Интенсификация процессов:

- использование систем автоматического управления для оптимизации процессов и повышения их эффективности.
- внедрение новых технологий и оборудования для повышения производительности и качества продукции [19, 20].

4. Обучение и подготовка персонала:

- организация регулярных тренингов и курсов повышения квалификации для сотрудников цеха;
- внедрение программ мотивации и поощрения для повышения уровня профессионализма и ответственности персонала [21].

Таким образом, оценка эффективности системы управления кислородно-конвертерного цеха требует комплексного подхода, включающего анализ производственных данных, моделирование процессов, оценку рисков и автоматизацию управления. Применение этих методов позволит не только повысить производительность и качество продукции, но и обеспечить безопасность и экологичность производства.

Разработанные методы и алгоритмы, основанные на данном подходе, могут быть и распространены на другие металлургические производства.

Список литературы

1. Проектирование цехов сталеплавильного производства: Учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению Металлургия / К.Н. Вдовин, В.Ф. Мысик, В.В. Точилкин, Н.А. Чиченев. Магнитогорск: МГТУ, 2016. 505 с.

2. Теория и технология металлургического производства: Межрегион. сб. науч. тр. / Под. ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: МГТУ, 2004. Вып. 4. 243 с.

3. Тахаутдинов Р.С. Производство стали в кислородно-конвертерном цехе Магнитогорского металлургического комбината. Магнитогорск: [б. и.], 2001. 148 с.

4. Извеков Ю.А. Наркевич М.Ю. Квалиметрический метод оценки качества объектов металлургического предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23. № 2. С. 42-45.

5. Выплавка стали в 370 т конвертерах. Технологическая инструкция ТИ 101-СТ-ККЦ-2-2001. Магнитогорск: ММК, 2001 43 с.

6. Разливка стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) кислородно-конвертерного цеха № 1. Технологическая инструкция ТИ 101-СТ-ККЦ-10-2003. Магнитогорск: ММК, 2003. 102 с.

7. Сталеплавильное производство. Конвертерный цех №1. Охрана труда. Магнитогорск: Магнитогорский ГИПРОМЕЗ, 1986. 147 с.

8. Рожков И.М., Власов С.А., Мулько Г.Н. Математические модели для выбора рациональной технологии и управления качеством стали. М.: Металлургия, 1990. 398 с.

9. Чижов А.Б., Вальтер А.И. Исследование процесса подготовки металлошихты для конвертерной выплавки стали // Современные материалы, техника и технология: Сб. науч. статей 10-й междунар. науч.-практ. конф. Курск: ЮЗГУ, 2020. С. 430-433. DOI 10.47581/2020/30.12.2020/MTO54.1.105.

10. Линчевский Б.В., Соболевский А.Л., Кальменев А.А. Металлургия черных металлов: Учеб. для сред. учеб. заведений по специальности «Металлургия черных металлов» / Под ред. Б.В. Линчевского. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1999. 335 с.

11. Федеральный закон Российской Федерации «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116-ФЗ. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/9046058 (дата обращения: 21.10.2024).

12. Методические рекомендации по классификации аварий и инцидентов на опасных производственных объектах металлургических и коксохимических производств. РД 11-405-01. Утверждены Приказом Госгортехнадзора России от 30.05.2001 № 73. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1200008176 (дата обращения: 21.10.2024).

13. Методические рекомендации по классификации аварий и инцидентов на подъемных сооружениях, паровых и водогрейных котлах, сосудах, работающих под давлением, трубопроводах пара и горячей воды. РД 10-385-00. Утверждены Постановлением Госгортехнадзора России от 04.10.2000 № 58. [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1200006343?marker (дата обращения: 21.10.2024).

14. Методические рекомендации по классификации аварий и инцидентов на опасных производственных объектах газового хозяйства, подконтрольных газовому надзору. РД 12-378-00. Утверждены Приказом Госгортехнадзора России от 22.08.2000 № 93. [Электронный ресурс] URL: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/250583/ (дата обращения: 21.10.2024).

15. Анцев В.Ю., Толоконников А.С., Горынин А.Д. Стандартизация в области оценки рисков при проектировании грузоподъемных кранов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 12-1. С. 223-229.

16. Анцев А.В., Клочкова М.Н. Применение технологий машинного зрения в металлургическом производстве // 60-я Науч.-практич. конф. профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всеросс. участием: Сб. докл. В 2-х ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. С. 51-55.

17. Моделирование процесса планирования производственной деятельности предприятия-разработчика авиационной техники / М.Н. Фетисов, С.А. Васин, В.Ю. Анцев, Н.В. Анцева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 5. С. 147-152.

18. Izvekov Yu.A., Torshina O.A. Mathematic modelling of reliability, safety and risk indicators related to equipment elements existing at iron and steel enterprise // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Т. 687. V. 6. P. 066008. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066008.

19. Алгоритм оценки качества конструкций эксплуатируемого технологического оборудования / Ю.А. Извеков, И.Е. Ильин, А.С. Путенихина, К.О. Светус // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тез. докл. 82-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: МГТУ, 2024. С. 378.

20. Аканчев Н.В. Общеобменная вентиляция цехов с тепловыделениями. М.: Стройиздат, 1984. 144 с.

21. Байделл Т.К. Как улучшить управление организацией. М.: Инфра-М, 1999. 204 с.

Путенихина Анна Сергеевна, аспирант, anya1320062012@mail.ru, Россия, Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,

Ильин Иван Евгеньевич, аспирант, Ivan2011.ilyin@mail.ru, Россия, Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,

Извеков Юрий Анатольевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, yurij.izvekov@mail.ru, Россия, Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,

Шеметова Вероника Владимировна, канд. физ.-мат. наук, доц., shemetova-vv@mail.ru, Россия, Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

SYSTEM APPROACH TO IMPROVING THE MANAGEMENT OF THE OXYGEN CONVERTER SHOP OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

A.S. Putenikhina, I.E. Ilyin, Y.A. Izvekov, V.V. Shemetova

This article analyses the management system of the oxygen-converter shop of a metallurgical enterprise, proposes methods of its improvement, which in the future will make it possible to assess the efficiency, quality and reliability of the functioning of such management system. The analysis and the proposed integrated approach to improving the management system of metallurgical production involves increasing the overall efficiency of management, improving the quality of products and ensuring the reliability of operation of production systems, as well as profit.

Key words: metallurgical enterprise, oxygen converter shop, control system, efficiency, quality, reliability, methods, algorithms.

Putenikhina Anna Sergeevna, postgraduate, anya1320062012@mail.ru, Russia, Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Ilyin Ivan Evgenievich, postgraduate, Ivan2011.ilyin@mail.ru, Russia, Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Izvekov Yury Anatolyevich, doctor of technical sciences, docent, head of the department, yurij.izvekov@mail.ru, Russia, Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University,

Shemetova Veronica Vladimirovna, candidate of Physical and Mathematical Sciences, docent, shemetova-vv@mail.ru, Russia, Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University

УДК 004.93
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-364-365

РАСПОЗНАВАНИЕ СИГНАЛОВ КАШЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕЛ-СПЕКТРОГРАММ И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Д.А. Ещенко, Г.В. Абрамов

В статье рассматривается задача автоматического распознавания сигналов кашля с использованием методов машинного обучения с целью решения задачи классификации сигналов на кашли и шумы. Для анализа звуковых сигналов применяются мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC), которые служат основой для извлечения характеристик сигнала. В процессе предобработки данных, включая нормализацию и фильтрацию шумов, применяются различные фильтры по частотам и временным шкалам к мел-спектрограмме с целью улучшения точности распознавания. Проводится сравнение результатов классификации в зависимости от применяемых фильтров. Основное внимание уделяется применению моделей сверточных нейронных сетей (CNN) для классификации звуковых сигналов кашля. Оценка качества разработанной модели проводится по стандартным статистическим метрикам, что позволяет детально оценить эффективность предложенного подхода. Результаты исследования демонстрируют потенциал использования сверточных нейронных сетей в задачах автоматического распознавания сигналов кашля, а также подчеркивают важность выбора и настройки частотных и амплитудных фильтров для повышения точности распознавания.

Ключевые слова: распознавание сигналов кашля, классификация сигналов, подготовка звуковых данных кашля, мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC), мел-спектрограмма, спектрограмма, сверточные нейронные сети (CNN), предобработка данных, частотные и временные фильтры, нормализация сигналов.

1. Введение. Респираторные заболевания остаются одной из самых распространенных причин заболеваемости и смертности по всему миру. Согласно данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), такие инфекции, как грипп, пневмония и хронические обструктивные болезни легких (ХОБЛ), астмы, бронхиты различного характера ежегодно вызывают миллионы случаев госпитализаций и приводят к значительному числу смертей по всему миру [1].

С начала пандемии COVID-19 проблема мониторинга кашля приобрела еще большую актуальность. По данным исследований, кашель наблюдается у подавляющего числа пациентов с диагнозом COVID-19. Мониторинг является важным средством контроля источников инфекции при различных пандемиях [2].

История разработки систем мониторинга кашля насчитывает несколько десятилетий. Еще в 1950-х годах начались попытки создания методов для учета частоты кашля. Первые системы использовали ленточные магнитофоны, а пациенты должны были находиться в одном помещении с микрофоном в течение всего времени записи. Полученные звуковые сигналы кашля вручную прослушивались для их последующего подсчета, что делало процесс очень трудоемким. С развитием технологий записи звука появилась возможность использовать цифровые методы анализа звуковых событий. Однако на данный момент не существует стандартизированного метода мониторинга частоты кашля, который был бы коммерчески доступен и клинически применим [3].

В настоящее время существуют различные подходы к анализу и классификации кашля как с использованием методов машинного обучения [4], так и с использованием других методов. Одним из наиболее широко используемых методов является метод мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC) [5], который успешно применяется в задачах распознавания речевых аудиосигналов. Следует отметить, что в существующих исследованиях также использовались: гамматоновые кепстральные коэффициенты (GTCC), метод опорных векторов (SVM), деревья классификации и искусственные нейронные сети различных конфигураций (ANN) [6]. Однако на данный момент не существует как общепринятого стандарта оптимального набора акустических характеристик, так и общепринятого метода распознавания сигналов кашля [7].

Важность мониторинга кашля заключается не только в его способности идентифицировать заболевания, но и в возможности наблюдать за частотой и типом кашля в режиме реального времени, что может дать ценную информацию о состоянии пациента. Исследования показывают, что глубокие нейронные сети (DNN) [6, 7], включая сверточные нейронные сети (CNN) [8, 9], демонстрируют достойные результаты в задачах распознавания кашля благодаря их способности извлекать сложные и устойчивые признаки по сравнению с другими способами извлечения характеристик [10].

В данной работе рассматриваются современные методы распознавания кашля с применением методов машинного обучения. Предлагается подход, основанный на использовании мел-частотных кепстральных коэффициентов и сверточных нейронных сетей для классификации кашля. В процессе анализа применяются различные фильтры, как по частотам, так и по временным интервалам. Также обсуждаются возможные направления дальнейших исследований в этой области, которые могут привести к созданию более эффективных и надежных систем мониторинга респираторного здоровья.

2. Гипотезы. В рамках исследования были выдвинуты следующие гипотезы:

1. Звуковой сигнал кашля распределен в конкретном диапазоне частот, специфичном для каждого конкретного человека и зависит от пола, возраста, высоты голоса. Данный факт позволяет анализировать не всю спектрограмму, а только ее часть, применяя различные варианты фильтрации для улучшения качества распознавания.

2. Звуковой сигнал одного конкретного события кашля, как правило, является достаточно непродолжительным во времени (менее 1 сек, в среднем: 300-500мс). Данный факт позволяет сделать предположение о том, что фильтрация данных по временной шкале, удаление сегментов тишины и низкой амплитуды сигнала позволит улучшить качество распознавания и увеличит скорость обработки данных в связи с уменьшением размера входных данных.

3. Спектрограмма, а также ее разновидность мел-спектрограмма, являются в некотором роде «структурированным изображением сигнала». Известно, что сверточные нейронные сети отлично показывают себя для распознавания и создания изображений. В связи с этим, можно выдвинуть гипотезу о том, что сверточные нейронные сети

могут показать достойные результаты для решения задачи классификации на кашли или шумы. Достойными результатами в данной работе будем считать значения точности распознавания выше 75%

3. Основная часть. Решение задачи распознавания сигналов кашля включает определенный набор шагов. Визуальная презентация этих шагов представлена на рис.1

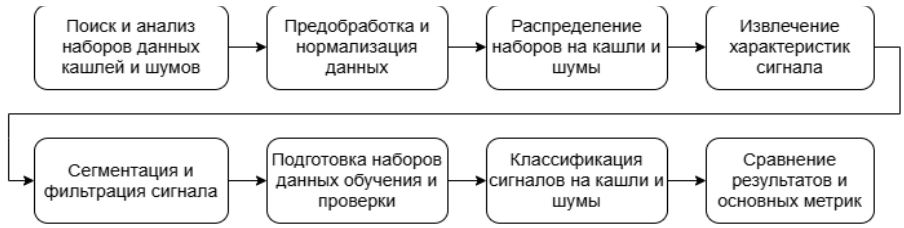


Рис. 1. Основные стадии для решения задачи распознавания сигналов кашля

3.1. Поиск и анализ подходящих наборов данных. Для проведения исследования был осуществлен поиск и систематизация различных наборов данных, содержащих как записи кашля, так и другие звуки, которые в данной работе будут классифицироваться как шумы. Шумы представляют собой краткосрочные резкие звуковые события, схожие с кашлем, однако им не являющимися.

Наборы данных были получены из открытых интернет источников, а именно:

1. COUGHVID Dataset [11] — открытый набор данных, предназначенный для исследования и разработки систем диагностики заболеваний дыхательных путей. Набор данных был создан на основе кашлей пациентов во время пандемии COVID-19. Набор данных включает более 25000 записей кашлей и шумов.

2. ESC-50: Dataset for Environmental Sound Classification [12] — открытый набор данных для классификации звуков окружающей среды. Набор включает около 2000 различных типов звуков окружающей среды, среди которых есть кашли.

3. Qure.AI Dataset [13] — набор данных, разработанный компанией Qure.AI. Набор данных включает около 3000 записей кашлей и шумов.

4. SensiML Dataset [14] — набор данных, разработанный компанией SensiML. Набор данных включает около 3000 записей кашлей и шумов.

В результате из вышеуказанных наборов был сформирован общий набор данных общего 28000 необработанных записей кашлей и шумов.

3.2. Предобработка и нормализация данных. В рамках данного этапа была осуществлена предобработка сформированного набора данных с целью приведения его к единому формату, а именно: получение аудиозаписей одинаковой длины и частоты дискретизации в едином формате. В общем виде будем называть данный этап нормализацией данных.

Все исходные аудиозаписи были сохранены в .wav (waveform) формате. Данный формат является стандартом для использования в обработке сигналов, так как он фактически является самой презентацией исходного сигнала без какого-либо сжатия. Однако записи в исходных наборах данных были разной длины с различной частотой дискретизации. Более того, записи кашля были смешаны с данными шумов, что требовало разделения для использования методов машинного обучения.

С использованием библиотеки Librosa языка Python была осуществлена реализации скриптов двух основных скриптов предобработки данных, которые позволяют сделать необходимые преобразования и нормализацию данных:

1. Скрипт с основной логикой предобработки и нормализации.
2. Скрипт с расширенной логикой предобработки и нормализации.

Рассмотрим логику работы каждого скрипта подробнее.

Визуальная презентация шагов скрипта с основной логикой предобработки и нормализации сигнала представлена на рис.2

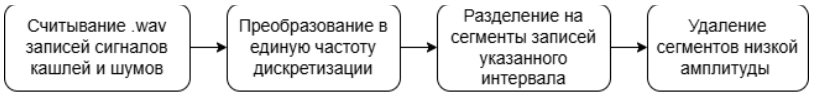


Рис. 2. Стадии предобработки данных основного скрипта

В данном исследовании была использована частота дискретизации 22050 Гц. Данная частота является стандартной для обработки сигналов и позволяет хранить исходный сигнал в достаточно детализированном виде при среднем размере аудиозаписи.

Ввиду того, что данные были получены из наборов от различных источников, большинство из них имели разную длину, начиная от нескольких секунд, заканчивая несколькими минутами с периодами кашлей, шумов и тишины. Для осуществления дальнейшей обработки возникла необходимость извлечь небольшие части аудиозаписей единого временного интервала. Разделение было осуществлено на интервалы по 500мс и по 1с и сохранено в отдельные наборы данных. Данное разделение было произведено для выполнения сравнительного эксперимента влияния длины интервалы на точность прогнозирования. Значения 500мс и 1с были выбраны, основываясь на данных в существующих научных работах о средней длине кашля [15]. Однако следует отметить, что существуют приступы кашлей. Данные явления представляют собой серии одиночных событий кашля продолжительностью менее 1с. В данной статье приступы и серии кашлей анализируются как набор отдельных независимых событий кашля.

Помимо этого, была реализована расширенная версия данного скрипта, задача которого состояла в выполнении предобработки и нормализации данных в другом виде. Это необходимо для выполнения нескольких вариантов сегментации и фильтрации сигнала, о котором будет детальнее описано в следующих разделах данной статьи.

Визуальная презентация шагов скрипта расширенной логикой предобработки и нормализации предобработки и нормализации сигнала представлена на рис.3



Рис. 3. Стадии предобработки данных скрипта с расширенной логикой обработки

Пример построения амплитудной огибающей для получения экстремумов амплитуды сигнала представлен на рис.4.

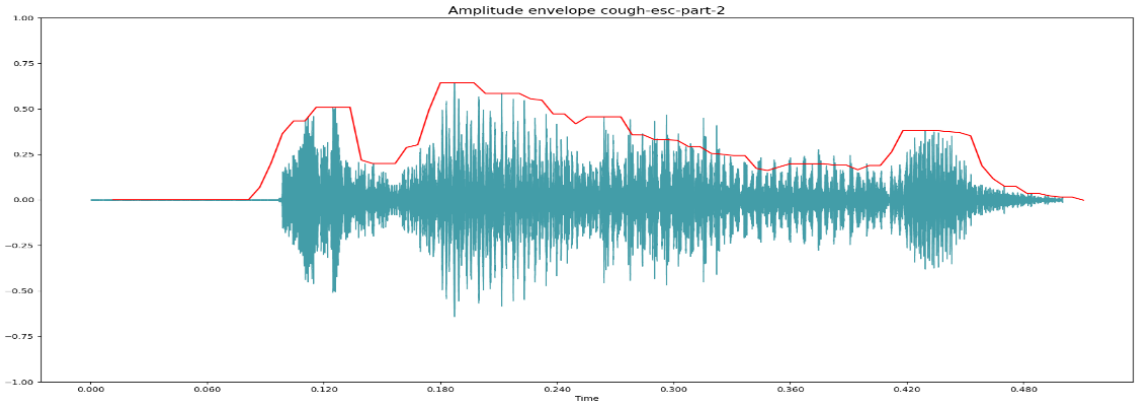
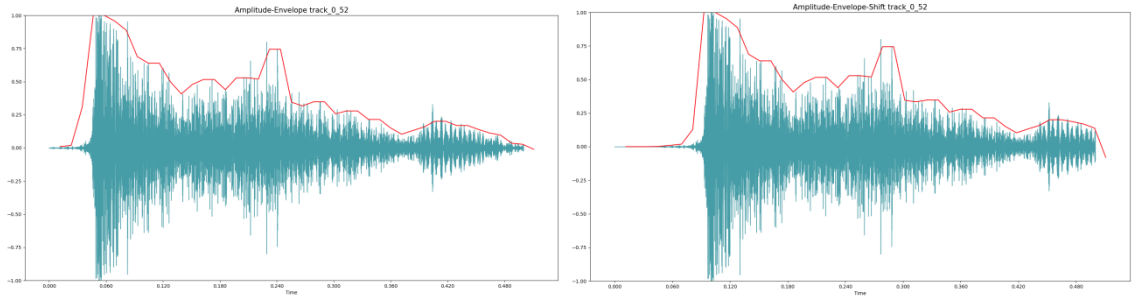


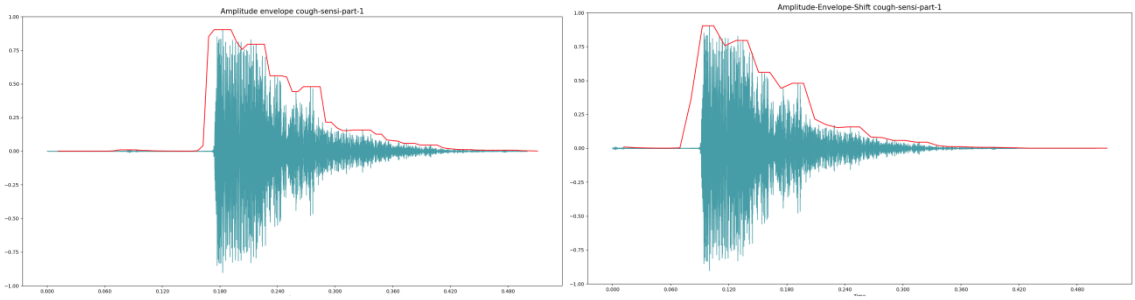
Рис. 4. Амплитудная огибающая сигнала кашля

Поиск локальных экстремумов амплитуды сигнала на амплитудной огибающей необходим для того, чтобы максимальная интенсивность сигнала всегда находилась бы в одном и том же месте на временной шкале относительно начала аудиозаписи. Алгоритм определяет количество максимумов, которое может быть обнаружено в исходной аудиозаписи с учетом ее продолжительности. Например, если длина аудиозаписи составляет 15 секунд, а временная шкала разделяется на отрезки по 500 мс, то алгоритм будет искать не более 30 максимумов.

Данный скрипт с расширенной логикой предобработки обеспечивает подготовку данных аналогично базовому скрипту, но дополнительно к основной логике преобразования он гарантирует, что максимальный пик амплитуды сигнала кашля или шума располагается в одной и той же точке относительно начала сегмента сигнала. В данной работе используется значение 100мс в качестве отклонения от максимума амплитуды. Примеры расположения максимальной амплитуды представлены на рис.5



(a) Пример 1. До преобразования (b) Пример 1. После преобразования



(c) Пример 2. До преобразования (d) Пример 2. После преобразования

Рис. 5. Амплитудная огибающая со смещением максимума амплитуды

В результате выполнения всех шагов преобразования были получены несколько наборов данных аудиозаписей кашлей и шумов. Наборы данных описаны в табл. 1.

Таблица 1

Сформированные наборы данных после преобразования и нормализации

Формат	Частота дискретизации	Длина сегмента	Макс. амплитуды	Размер
wav	22050 Гц	500 мс	случайное место	21320
wav	22050 Гц	1 с	случайное место	10660
wav	22050 Гц	500 мс	через 100 мс	15560
wav	22050 Гц	1 с	через 100 мс	7780

Для применения алгоритмов машинного обучения необходимы данные, которые уже будут разделены на кашли и шумы с высокой точностью. Однако ввиду того, что данные получены из разных источников, возникла необходимость проверки корректного разделения данных. Использование автоматизированных алгоритмов для данного этапа проверки и подготовки данных не представляется возможным, так как целью текущей работы является разработка такого алгоритма. В связи с этим, была проведена работа по ручному разделению данных с целью идентификации сигналов кашля.

В результате после выполнения ручного разделения были получены новые разделенные наборы данных из ранее нормализованных наборов (табл.2)

Таблица 2

Сформированные наборы данных после разделения данных

Сегмент	Макс. амплитуды	Исх. размер	Кашлей	Шумов	Удалено	Рез. размер
500 мс	случайное место	21320	6620	12765	1935	19385
1 с	случайное место	10660	3301	6184	1175	9485
500 мс	через 100 мс	15560	4970	8215	2375	13185
1 с	через 100 мс	7780	2356	4244	1180	6600

3.3 Извлечение характеристик и фильтрация сигнала. Существуют различные методы извлечения необходимых характеристик сигнала для их последующей обработки. Следует отметить, что извлечение характеристик является одним из самых важных этапов в распознавании любого сигнала, так как происходит выделение отдельных частей сигнала и фильтрация других.

В настоящее время в научных работах представлена широкая вариативность выбора характеристик и алгоритмов их извлечения [3, 4, 5, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24].

Мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC) и вариации являются одними из наиболее широко используемых признаков для распознавания сигналов кашля [3, 4, 5, 8, 17, 18, 20]. Изначально популярные в автоматическом распознавании речи, MFCC представляют собой огибающую спектра мощности звукового сигнала.

Помимо MFCC, для обнаружения кашля в существующих работах использовались и другие признаки. Среди них можно выделить: показатель негауссовости, который измеряет степень отклонения сигнала от гауссовой модели, что часто проявляется в звуках кашля; логарифмическую энергию, связанную с амплитудой сигналов кашля; и моменты Ху, метод, широко используемый в обработке изображений, который был адаптирован для обработки сигналов из речи [3, 10, 20, 21, 22, 24].

Как правило, признаки комбинируются для формирования входного набора данных для классификации, однако нет единого стандарта для оптимального набора акустических признаков для обнаружения кашля.

С учетом вышеизложенного можно сделать вывод о том, что существующие научные данные по вопросам распознавания кашля показывают достаточно хорошую эффективность метода мел-частотных кепстральных коэффициентов для извлечения характеристик различных звуковых сигналов, в том числе для сигналов кашля.

Рассмотрим шаги, которые необходимо выполнить для перехода от исходного сигнала в .wav формате к мел-частотным кепстральным коэффициентам.

1. Применение окна Хэмминга (1):

$$w[n] = 0.54 - 0.46 \cdot \cos(\frac{2\pi n}{N-1}), \tag{1}$$

где N – длина окна, n – индекс внутри окна

2. Применение Быстрого преобразования Фурье (БПФ) (2):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \tag{2}$$

где X[k] – результат БПФ, x[n] – входной сигнал, N – размер окна, k – индекс частоты

3. Получения спектра мощности (3):

$$P[k] = \frac{1}{N} \cdot \left|X[k]\right|^2, \tag{3}$$

где P[k] – спектральная плотность мощности, N – размер окна, X[k] – значение спектра частот

4. Преобразование в мел-шкалу (4):

$$m(f) = 2595 \cdot \log_{10}(1 + \frac{f}{700}), \tag{4}$$

где m(f) – мел-шкала частот, f – частота звука

5. Применение мел-фильтров к спектру мощности

$$S[m] = \sum_{k=0}^{N-1} P[k] \cdot H_m[k], \tag{5}$$

где S[m] – энергия сигнала в M-мел-частотном диапазоне, P[k] – Мощность спектра сигнала, $H_m[k]$ – коэффициент m-ого мел-фильтра для k-й частоты

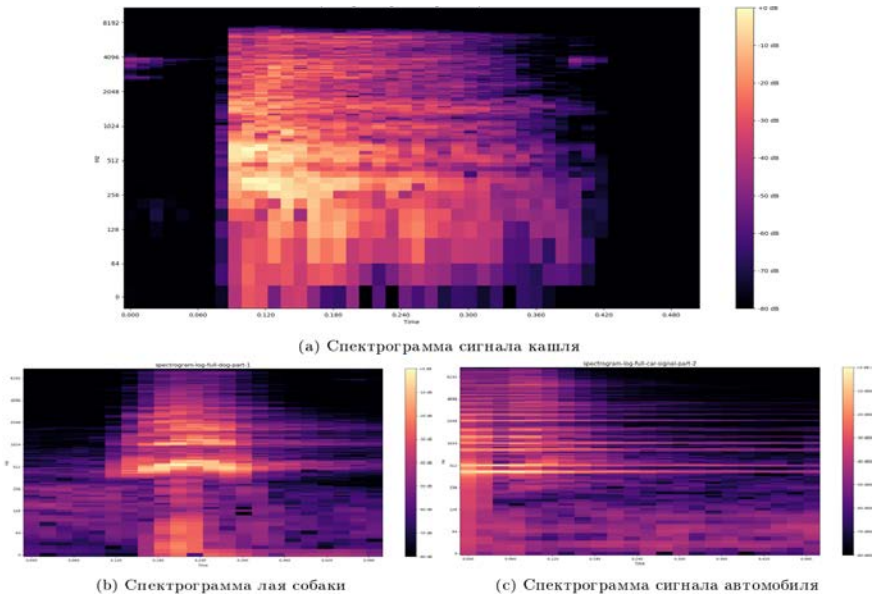
6. Применение обратного дискретного косинусного преобразования (ДКП)

$$MFCC[n] = \sum_{n=0}^{M-1} \log S[m] \cdot \cos[\frac{\pi}{M}(n+\frac{1}{2})m], \quad (6)$$

где MFCC[n] – кепстральные коэффициенты, log S[m] – логарифмированное значение мел-спектра, M – кол-во мел-фильтров.

Для извлечения мел-частотных кепстральных коэффициентов был реализован скрипт с использованием библиотеки Librosa языка Python. Данный скрипт имеет функционал построения спектрограмм, а также получения мел частотных кепстральных коэффициентов из входных аудиозаписей сигналов кашлей и шумов.

Примеры построенных спектрограмм представлены на рис.6



(a) Спектрограмма сигнала кашля

(b) Спектрограмма лая собаки (c) Спектрограмма сигнала автомобиля

Рис. 6. Примеры построенных спектрограмм для кашлей и шумов

3.4. Сегментация и фильтрация сигнала. Для проверки гипотез (1) и (2), выдвинутых в разд. 2, необходимо построить различные мел-спектрограммы, а также создать мел-частотные кепстральные коэффициенты в зависимости от фильтров по частотам и временным шкалам.

Были выбраны следующие варианты для фильтраций по частотам:

- Низкие частоты: значения *0 - 5000 Гц*
- Средние частоты: значения *3000 - 8000 Гц*
- Высокие частоты: значения *8000 - 15000 Гц*
- Средне-низкие частоты: *1500 - 6000 Гц*
- Поиск максимума интенсивности на спектрограмме и использование диапазона *±3000 Гц* в обе стороны по частотам спектрограммы.

Для фильтрации по временной шкале были использованы наборы данных, подготовленные расширенной версией скрипта в разд. 3.2. Особенность данных наборов состоит в том, что максимальная амплитуда сигнала в них расположена в одной и той же точке на временной шкале относительно начала сегмента. Примеры построенных спектрограмм с учетом различных вариантов фильтрации представлены на рис.7.

3.5 Классификация сигнала на кашли или шумы. Применение сверточных нейронных сетей (CNN) для решения задачи распознавания кашля представляется целесообразным и эффективным по ряду причин. В первую очередь, сверточные нейронные сети обладают способностью автоматически извлекать значимые признаки из данных. В контексте распознавания кашля, звуковые сигналы могут быть изображены в виде спектрограммы (мел-спектрограммы), которые представляют собой изображение частотно-временной структуры сигнала. Сверточные нейронные сети, благодаря своей архитектуре, оптимально работают с изображениями, что позволяет использовать их для анализа спектрограмм и мел-спектрограмм кашля и эффективного решения задачи классификации на кашель или шум.

Основное преимущество сверточных нейронных сетей заключается в способности сверточных слоёв эффективно обрабатывать многомерные данные, сохраняя пространственные взаимосвязи между признаками. Это особенно актуально при распознавании кашля, поскольку различие между кашлем, речью и посторонними шумами может зависеть от тонких вариаций в частотной структуре сигнала, которые визуализируются на спектрограмме. Сверточные нейронные сети могут выявить эти различия при помощи операции свёртки, что делает их особенно эффективными для задач, связанных с обработкой изображений, в том числе анализ спектрограмм.

Мел-частотные спектральные коэффициенты (MFCC) могут быть более эффективными для анализа кашля по сравнению с использованием полной спектрограммы, поскольку они лучше моделируют восприятие звуков человеческим слухом. В отличие от спектрограммы, которая представляет полную частотную информацию сигнала, MFCC акцентируют внимание на тех частотах, которые наиболее чувствительны для человеческого слуха, уменьшая влияние высокочастотных шумов и ненужных деталей. Это особенно важно для задачи распознавания кашля, где ключевые отличительные признаки сигнала могут находиться в определённом частотном диапазоне.

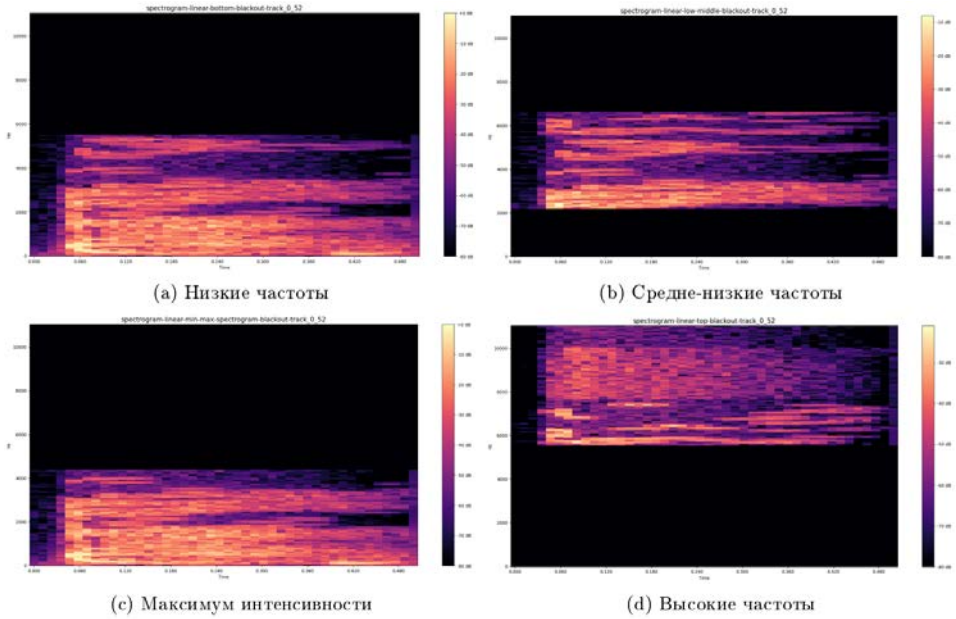


Рис. 7. Варианты фильтрации спектрограммы сигнала по частотам

В рамках данной работы были проведены эксперименты по поиску конфигурации сети показывающей наиболее качественные результаты. В результате была выбрана нейронная сеть со следующими характеристиками:

- Скорость обучения: 0.0001. Используется небольшое значение, что позволяет более аккуратно и плавно обновлять веса, чтобы избежать резких колебаний в процессе обучения и способствует более стабильной сходимости.
- Оптимизатор: Adam (Адаптивная оценка моментов). Комбинирует преимущества оптимизаторов Момент (Momentum) и RMS-оптимизация (RMSprop).
- Функция потерь: Binary Crossentropy. Исползуется данная функция, так как решается задача бинарной классификации на кашель и шум.
- Количество итераций (epochs, эпох): 20
- Размер пакета (batch size): 32

Рассмотрим описание модели сверточной нейронной сети:

1 и 2 слои имеют одинаковую конфигурацию:

- Сверточный слой с 32 нейронами, активац. функция – ReLU, ядро – (3,3)
- Слой максимальной выборки 2D (Max pool 2D), ядро (3,3), шаг свертки – (2,2)
- Нормализация по пакетам (Batch Normalization)

3 слой имеет схожую конфигурацию с 1 и 2 слоем, однако отличается размером ядра свертки. Ядро – (2,2)

Выравнивающий (flatten) слой имеет следующую конфигурацию:

- Выравнивающий (flatten) слой
- Полносвязный (Dense) слой с 32 нейронами, активационная функция – ReLU
- Слой со случайным отсевом нейронов (Dropout) с коэффициентом 0.3

Выходной слой с активационной функцией - softmax и 2 нейронами, соответствующим значениям кашель и шум.

Визуальная модель сверточной нейронной сети представлена на рис.8.

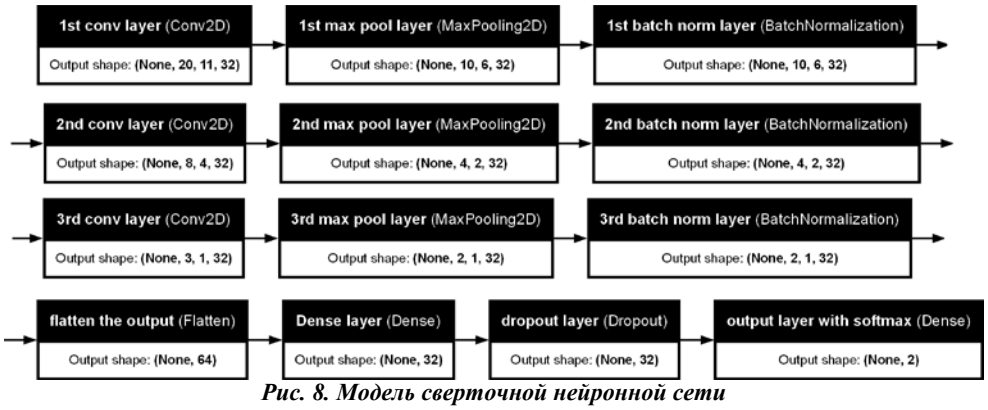


Рис. 8. Модель сверточной нейронной сети

Подготовленные наборы из разд. 3.2 использовались для обучения данной нейронной сети. Эти данные обеспечили необходимую основу для успешного обучения модели, а также позволили провести глубокий анализ ее производительности. Все результаты экспериментов, включая нужные ключевые метрики, были зафиксированы и сохранены для дальнейшего анализа и сравнения с другими моделями.

4. Сравнение результатов. Рассмотрим основные используемые метрики, используемые для оценки точности распознавания сигналов кашля

- Точность положительных результатов (7)

$$\Pr ecision = \frac{TP}{TP + FP}, \tag{7}$$

- Точность с учетом ложно-(положительных и отрицательных) результатов (8)

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \tag{8}$$

- Полнота (9)

$$\mathrm{Re}call = \frac{TP}{TP + FN}, \tag{9}$$

- F1-мера (10)

$$F1 = 2 \cdot \frac{\Pr ecision \cdot \mathrm{Re}call}{\Pr ecision + \mathrm{Re}call}, \tag{10}$$

где TP – истинно положительный результат (True Positive), TN – истинно отрицательный результат (True Negative), FP – ложноположительный результат (False Positive), FN – ложноотрицательный результат (False negative).

Результаты по указанным метрикам по каждому из наборов данных, представленных в разд. 3.2. с использованием обученной сверточной нейронной сети из разд. 3.6. представлены в табл. 4,5,6,7, а именно:

- Набор данных с аудиозаписями по 500 мс, макс. амплитуды в случайном месте. Размер подготовленного набора: 19385 записей, среди которых 6620 кашлей и 12765 шумов. Результат представлен в табл. 3

Таблица 3

Результаты по подготовленному набору 1

Фильтрация по частотам	**Точность полож. результатов (Precision)**	**Точность с учетом ложн. результатов (Accuracy)**	**Полнота (Recall)**	**F1-мера (F1-score)**
без фильтрации	0,8364	0,8165	0,6911	0,7568
0-5000 Гц	0,8051	0,8269	0,7207	0,7606
1500-6000 Гц	0,8202	0,8420	0,7434	0,7800
3000-8000 Гц	0,7436	0,7397	0,5951	0,6612
8000-15000 Гц	0,6481	0,5878	0,4312	0,5178
Макс интенсивности и отступ ±3000 Гц	0,8496	0,8567	0,7594	0,8020

- Набор данных с аудиозаписями по 1 сек, макс. амплитуды в случайном месте. Размер подготовленного набора: 9485 записей, среди которых 3301 кашлей и 6184 шумов. Результат представлен в табл. 4

Таблица 4

Результаты по подготовленному набору 2

Фильтрация по частотам	**Точность полож. результатов (Precision)**	**Точность с учетом ложн. результатов (Accuracy)**	**Полнота (Recall)**	**F1-мера (F1-score)**
без фильтрации	0,8382	0,8350	0,7286	0,7795
0-5000 Гц	0,7967	0,8006	0,6831	0,7356
1500-6000 Гц	0,8179	0,7977	0,6721	0,7379
3000-8000 Гц	0,7334	0,7139	0,5689	0,6408
8000-15000 Гц	0,6574	0,5964	0,4459	0,5313
Макс интенсивности и отступ ±3000 Гц	0,8531	0,8453	0,7412	0,7932

- Набор данных с аудиозаписями по 500 мс, макс. амплитуды через 100 мс после начала записи. Размер подготовленного набора: 13185 записей, среди которых 4970 кашлей и 8215 шумов. Результат представлен в табл. 5

Таблица 5

Результаты по подготовленному набору 3

Фильтрация по частотам	**Точность полож. результатов (Precision)**	**Точность с учетом ложн. результатов (Accuracy)**	**Полнота (Recall)**	**F1-мера (F1-score)**
без фильтрации	0,8511	0,8481	0,7702	0,8086
0-5000 Гц	0,8189	0,8236	0,7406	0,7778
1500-6000 Гц	0,8088	0,7561	0,6396	0,7143
3000-8000 Гц	0,7243	0,6770	0,5537	0,6277
8000-15000 Гц	0,6791	0,6384	0,5154	0,5860
Макс интенсивности и отступ ±3000 Гц	0,8661	0,8796	0,8236	0,8443

- Набор данных с аудиозаписями по 1 сек, макс. амплитуды через 100 мс после начала записи. Размер подготовленного набора: 6600 записей, среди которых 2356 кашлей и 4244 шумов. Результат представлен в табл. 6

Таблица 6

Результаты по подготовленному набору 4

Фильтрация по частотам	**Точность полож. результатов (Precision)**	**Точность с учетом ложн. результатов (Accuracy)**	**Полнота (Recall)**	**F1-мера (F1-score)**
без фильтрации	0,8221	0,8356	0,7441	0,7812
0-5000 Гц	0,7988	0,8018	0,6929	0,7421
1500-6000 Гц	0,8281	0,8108	0,6980	0,7575
3000-8000 Гц	0,7385	0,7297	0,5983	0,6611
8000-15000 Гц	0,6384	0,6406	0,5320	0,5804

Макс интенсивности и отступ ±3000 Гц	0,8489	0,8333	0,7280	0,7843

5. Выводы. Опираясь на полученные результаты, представленные в табл. 4, 5, 6, 7 можно сделать следующие выводы:

1) Сверточные нейронные сети показывают достойные результаты распознавания сигнала кашля при обработке мел-частотных кепстральных коэффициентов. Наилучшие результаты распознавания достигают 86,61%. Таким образом, можно сделать вывод, что гипотеза 3, выдвинутая в разд. 2 на данный момент, подтверждается.

2) Использование частотных фильтров дает различные результаты в зависимости от типа фильтрации.

Рассмотрим результаты по каждому из фильтров подробнее:

- Фильтрация по высоким частотам: 8000-15000 Гц показывает заметное ухудшение качество распознавания по сравнению с другими вариантами. В связи с этим следует принять данный фильтр несостоятельным для решения задачи распознавания кашля.

- Фильтрация по средним частотам: 3000-8000 Гц, в среднем, показывает худшие результаты по сравнению с вариантом без применения фильтра, также как и с фильтрацией по низким, средне-низким частотам.

- Фильтрация по низким 0-5000 Гц и средне-низким 1500-6000 частотам, в среднем, показывает схожие результаты в сравнении с вариантом без применения фильтрации. Однако данный подход позволяет уменьшить размер анализируемых данных, в связи с тем, что происходит анализ и извлечение мел-частотных кепстральных коэффициентов только части мел-спектрограммы. Таким образом, данный вариант фильтрации разумно использовать в будущих исследованиях в качестве одного из вариантов фильтрации.

- Фильтрация с поиском максимума интенсивности, а также с последующим отступом от максимума на значение в 3000 Гц показывает наилучшие результаты по сравнению с другими вариантами фильтраций. Однако следует заметить, что значения точности распознавания, в среднем, схожи с вариантом без применения фильтрации. Заметный плюс данного варианта фильтрации по сравнению с фильтрами по низким и средне-низкими частотам является то, что данный вариант является более чувствительным к высоте голоса за счет возможности сдвига поддиапазона частот в зависимости от максимума амплитуды.

- Следует обратить внимание на вариант без применения фильтрации по частотам. Данный вариант показал схожие результаты с фильтрацией по средне-низкими и низким частотам. Таким образом, можно сделать вывод, что сверточные нейронные сети достаточно хорошо извлекают нужные характеристики без необходимости дополнительной фильтрации при решении задачи классификации кашля. Однако дополнительная фильтрация может помочь в уменьшении объема анализируемых данных для снижения нагрузки на систему распознавания. Нагрузка переходит с фазы распознавания на фазу подготовки предобработки данных.

3) Сегментация звукового сигнала по 500мс по сравнению с сегментацией сигнала по 1с не имеет значительного влияния на качество распознавания. Однако можно сделать вывод, что имеет смысл анализировать более короткие аудиозаписи по 500мс. В связи с тем, что, как правило, весь сигнал кашля входит в данный диапазон. Это позволяет сократить размер анализируемых частей, однако может увеличить кол-во анализируемых сегментов, при отсутствии фильтрации на клиентской части.

4) Смещение максимума амплитуды на одно и то же время с момента начала аудиозаписи увеличивает точность прогнозирования по сравнению со случайно расположенным пиком. Однако это влечет за собой дополнительную нагрузку на предобработку данных при интеграции алгоритма в реальную систему мониторинга кашля. При интеграции в реальную систему мониторинга имеет смысл дополнительно провести сравнение фильтрации, сегментации и смещения данных на клиенте по сравнению с серверной обработкой со смещением или же без ее использования.

Таким образом, можно сделать вывод, что гипотеза 2, выдвинутая в разд. 2 текущей работы на данный момент является разумной, но требует дополнительной верификации в контексте сравнения производительности дополнительной предобработки в реальном времени по сравнению с отправкой на вход нейронной сети данных без сдвига максимума амплитуды.

5) Использование кашлей и шумов из разных наборов данных позволяет увеличивать качество распознавания за счет большей вариативности кашлей и шумов.

Заключение. В данной работе представлено исследование по автоматическому распознаванию сигналов кашля с использованием методов машинного обучения. Основное внимание уделено применению сверточных нейронных сетей (CNN) для классификации звуков кашля на основе мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC).

Результаты экспериментов показали, что сверточные нейронные сети способны достигать высокой точности классификации, подтверждая гипотезу о том, что использование CNN эффективно для анализа структурированных данных звуковых сигналов, таких как мел-спектрограммы. Наилучшие результаты распознавания кашля были достигнуты при фильтрации по частотам – с поиском максимальной амплитуды сигнала; по временным шкалам – при сдвиге пика сигнала на одно и то же время, что подтверждает гипотезу о применении фильтрации для улучшения качества распознавания.

Вторичная предобработка данных, включающая фильтрацию по частотам и временным шкалам, также доказала свою эффективность, особенно в контексте уменьшения объема данных для анализа, что снижает нагрузку на систему распознавания. Однако необходимы дополнительные исследования по вопросу наилучшей производительности при применении максимального количества возможных фильтров на клиентской части по сравнению с отправкой неотфильтрованных данных на серверную часть для применения внутренней фильтрации самой сверточной нейронной сети.

Таким образом, предложенные в работе подходы к фильтрации, сегментации и классификации звуков кашля демонстрируют достойные результаты решения задачи распознавания сигнала кашля, однако они требуют дальнейшего совершенствования и верификации в контексте применения в реальных системах распознавания кашля.

Список литературы

1. World Health Organization (WHO). Respiratory diseases are among the leading causes of death worldwide / World Health Organization. 2020. [Электронный ресурс] URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/respiratory-diseases (дата обращения: 07.06.2024).

2. Hashmi H.A.S. Early Detection and Assessment of Covid-19 / H. A. S. Hashmi, H. M. Asif // Front. Med. 2020. Т. 7. С. 311.

3. Hall J.I. The present and future of cough counting tools / J. I. Hall, M. Lozano, L. Estrada-Petrocelli, S. Birring, R. Turner // Journal of Thoracic Disease. 2020. Т. 12, № 9. С. 5207–5223.

4. Ijaz A. Towards using cough for respiratory disease diagnosis by leveraging Artificial Intelligence: A survey / A. Ijaz, M. Nabeel, M. S. Hashmi, U. Masood, I. Posokhova, T. Mahmood, A. Rizwan, A. Imran // Informatics in Medicine. 2022. Т. 29. ID: 100832.

5. Zhou Q. Cough Recognition Based on Mel-Spectrogram and Convolutional Neural Network / Q. Zhou, J. Shan, W. Ding, C. Wang, S. Yuan, F. Sun, H. Li, B. Fang // Frontiers in Robotics and AI. 2021. Т. 8. ID: 580080.

6. Lee G.-T. Deep learning based cough detection camera using enhanced features / G.-T. Lee, H. Nam, S.-H. Kim, S.-M. Choi, Y. Kim, H. Park // Expert Systems With Applications. 2022. Т. 206. ID: 117811.

7. Pahar M. Automatic cough classification for tuberculosis screening in a real world environment / M. Pahar, M. Klopper, B. Reeve, R. Warren, G. Theron, T. Niesler // Physiological Measurement. 2021. Т. 42. ID: 105010.

8. Barata F. Towards Device-Agnostic Mobile Cough Detection with Convolutional Neural Networks / F. Barata, K. Kipfer, M. Weber, P. Tinschert, E. Fleisch, T. Kowatsch // IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI). 2019. ID: 8904554.

9. Gabaldón-Figueira J.C. Longitudinal passive cough monitoring and its implications for detecting changes in clinical status / J. C. Gabaldón-Figueira, E. Keen, M. Rudd, V. Orrilo, I. Blavia, J. Chaccour, M. Galvosas, P. Small, S. Grandjean Lapierre, C. Chaccour // ERJ Open Research. 2022. Т. 8. ID: 00001-2022.

10. Lee S.-E. Feasibility and Utility of a Smartphone Application-Based Longitudinal Cough Monitoring in Chronic Cough Patients in a Real-World Setting / S.-E. Lee, M. Rudd, T.-H. Kim, J.-Y. Oh, J.-H. Lee, L. Jover, P. M. Small, K. F. Chung, W.-J. Song // Lung. 2023. Т. 201. С. 555–564.

11. COUGHVID Dataset. COUGHVID: A large-scale cough audio dataset for disease detection / COUGHVID Dataset. 2020. [Электронный ресурс] URL: https://github.com/MLH-Fellowship/COUGHVID. (дата обращения: 05.04.2024).

12. ESC-50: Dataset for Environmental Sound Classification. ESC-50: A collection of 2000 environmental audio recordings for sound classification / ESC-50 Dataset. 2017. [Электронный ресурс] URL: https://github.com/karoldvl/ESC-50. (дата обращения: 03.03.2024).

13. Qure.ai Dataset. Qure.ai: Medical Imaging AI for Radiology and Pathology / Qure.ai. 2021. [Электронный ресурс] URL: https://www.qure.ai. (дата обращения: 12.03.2024).

14. SensiML Dataset. SensiML: A Dataset for Predictive Analytics in Healthcare / SensiML. 2021. [Электронный ресурс] URL: https://sensiml.com (дата обращения: 06.03.2024).

15. Lee K.K. Sound: a non-invasive measure of cough intensity / K. K. Lee, S. Matos, K. Ward, G. F. Rafferty, J. Moxham, D. H. Evans, S. S. Birring // BMJ Open Respiratory Research. 2017. Т. 4. e000178.

16. Rudd M. The Statistics of Counting Coughs: Easy as 1, 2, 3? / M. Rudd, W.-J. Song, P. M. Small // Lung. 2022. Т. 200. С. 531–537.

17. Gabaldón-Figueira J.C. Acoustic surveillance of cough for detecting respiratory disease using artificial intelligence / J. C. Gabaldón-Figueira, E. Keen, M. Rudd, V. Orrilo, I. Blavia, J. Chaccour, M. Galvosas, P. Small, S. Grandjean Lapierre, C. Chaccour // ERJ Open Research. 2022. Т. 8. ID: 00053-2022.

18. Alqudaihi K.S. Cough Sound Detection and Diagnosis Using Artificial Intelligence Techniques: Challenges and Opportunities / K. S. Alqudaihi, N. Aslam, I. U. Khan, A. M. Almuhaideb, S. J. Alsunaidi, N. M. Abdel Rahman Ibrahim, F. Alhaidari, F. S. Shaikh, Y. M. Alsenbel, D. M. Alalharith // IEEE Access. 2021. Т. 9. С. 102327–102344.

19. Kvapilova L. Continuous Sound Collection Using Smartphones and Machine Learning to Measure Cough / L. Kvapilova, V. Boza, P. Dubec, M. Majernik, J. Bogar, J. Jamison, J. C. Goldsack, D. J. Kimmel, D. R. Karlina // Digital Biomarkers. 2019. Т. 3. С. 166–175. DOI: 10.1159/000504666.

20. Cohen-McFarlane M. Comparison of Silence Removal Methods for the Identification of Audio Cough Events / M. Cohen-McFarlane, R. Goubran, F. Knoefel // 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). 2019. Т. 3. С. 1263–1268. DOI: 10.1109/EMBC.2019.8857889.

21. Mohammadi H. Automatic discrimination between cough and non-cough accelerometry signal artefacts / H. Mohammadi, A.-A. Samadani, C. Steele, T. Chau // Biomedical Signal Processing and Control. 2019. Т. 52. С. 394–402.

22. Nemati E. Poster Abstract: A Comprehensive Approach for Cough Type Detection / E. Nemati, M. M. Rahman, V. Nathan, K. Vatanparvar, J. Kuang // 2019 IEEE/ACM International Conference on Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies (CHASE). 2019. С. 15–16.

23. You M. Novel feature extraction method for cough detection using NMF / M. You, H. Wang, Z. Liu, C. Chen, J. Liu, X.-H. Xu, Z.-M. Qiu // IET Signal Processing. 2017. Т. 11, № 5. С. 515–520.

24. Ludena-Choez J. Feature extraction based on the high-pass filtering of audio signals for Acoustic Event Classification / J. Ludena-Choez, A. Gallardo-Antolin // Computer Speech and Language. 2015. Т. 30, № 1. С. 32–42.

Ещенко Дмитрий Алексеевич, аспирант, преподаватель, dmitrii.eshchenko@gmail.com, Россия, Воронеж, Воронежский государственный университет,

Абрамов Геннадий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, agwl@yandex.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный университет

COUGH SIGNALS RECOGNITION USING MEL-SPECTROGRAMS AND MEL-FREQUENCY CEPSTRAL COEFFICIENTS. APPLICATION OF VARIOUS FILTERS AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

D.A. Eshchenko, G.V. Abramov

The paper addresses the problem of automatic cough signal recognition using machine learning methods aimed at classifying signals into coughs and noise. Mel-frequency cepstral coefficients (MFCC) are used for analyzing sound signals, serving as the basis for feature extraction. During the data preprocessing phase, which includes normalization and noise filtering, various frequency and time-domain filters are applied to the mel-spectrogram to improve recognition accuracy. A comparison of classification results based on the applied filters is conducted. The main focus is on using convolutional neural network (CNN) models for classifying cough sound signals. The quality of the developed model is evaluated using standard statistical metrics allowing for a detailed assessment of the proposed approach's effectiveness. The results demonstrate the potential of convolutional neural networks in automatic cough signal recognition tasks and highlight the importance of selecting and tuning frequency and amplitude filters to enhance recognition accuracy.

Key words: cough signal recognition, signal classification, cough sound data preparation, mel-frequency cepstral coefficients (MFCC), mel-spectrogram, spectrogram, convolutional neural networks (CNN), data preprocessing, frequency and time filters, signal normalization.

Eshchenko Dmitrii Alekseevich, postgraduate, lecturer, dmitrii.eshchenko@gmail.com, Russia, Voronezh, Voronezh State University,

Abramov Gennady Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, agwl@yandex.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State University

УДК 614.8.084
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-373-374

К ВОПРОСУ О ПЕРСОНАЛИЗАЦИИ ОПОВЕЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ

Е.М. Леонова, А.Н. Леонова, Д.С. Котлячков

В данной статье обосновывается необходимость персонализации оповещения населения при различных видах и местах возникновения чрезвычайной ситуации, предлагается модель системы оповещения населения с функцией определения местоположения мобильных абонентов, приведены преимущества применения технологии персонализации оповещения населения.

Ключевые слова: цифровые технологии, оповещение населения, персонализация оповещения населения, чрезвычайные ситуации, безопасность жизнедеятельности.

На протяжении всего существования человечество пыталось и пытается защититься от угроз различного характера. Для этого требуется получение информации об опасности, то есть оповещение. Законодательство всех стран мира вменило в обязанность государству оповещение населения при чрезвычайных ситуациях различного характера (далее – ЧС) [1-2]. Информация оповещения должна содержать сведения о прогнозируемых и возникших ЧС, их последствиях, мерах по защите населения и территорий.

С развитием цифровых технологий стало возможным персональное оповещение каждого человека или группы людей, подверженных рискам ЧС, например, жителей определенного дома/района по эвакуации при взрыве газа, сотрудников экстренных служб и аварийно-спасательных подразделений при угрозе возникновения аварии на опасном производственном объекте. Персонализация оповещения — это процесс доведения информации о ЧС для каждого человека или группы людей (далее – оповещение). При этом информация оповещения должна быть понятной и релевантной, ее получение должно снимать чувство неопределенности и неуверенности.

Отметим преимущества персонализации оповещения населения:

целенаправленность, оповещение доводится только до той группы населения, которая действительно в нем нуждается;

своевременность, оповещение доводится в кратчайшие сроки;

релевантность, информация адаптирована под конкретного человека, его местоположение.

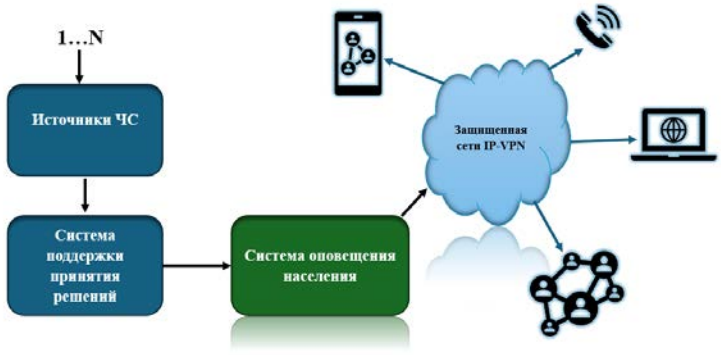
Примером персонализации оповещения является оповещение населения в транспортных средствах, по служебным телефонам или с учетом определения его местоположения. В этом случае в состав системы оповещения вводится дополнительная компонента - датчики определения местонахождения абонентов. Для этой цели могут использоваться трекеры местоположения - устройства, собирающие информацию о местоположении типа GPS-приемников, Bluetooth-меток и т.д., принадлежащие мобильным абонентам (пользователям).

В отличие от стационарных оконечных средств звукового и речевого оповещения (сирен, электронных сирен, громкоговорителей, выносных акустических установок), установленных в конкретных точках открытых пространств, мобильные абоненты системы оповещения могут принимать сигналы и информацию оповещения, используя различные технические средства персонального оповещения, например часы с установленным специальным приложением для приема и отображения сообщений о ЧС. К оконечным средствам персонального оповещения можно отнести портативные электронные устройства, сотовые телефоны и умные часы. Одновременно с общепринятым алгоритмом оповещения населения о ЧС могут использоваться SMS-уведомления, письма на электронную почту и т.д.

Для системы оповещение населения с функцией определения местоположения абонента дополнительно необходима разработка специального программного обеспечения (приложение), предназначенного для определения местоположения абонента, обработки и анализа данных местоположения в режиме реального времени, принятия решения и оповещении мобильного абонента. Серверная часть приложения устанавливается на автоматизированном рабочем месте оповещения населения (АРМ) системы оповещения населения и на сервере оператора связи (сервер оповещения мобильного абонента). Приложение после обработки данных о ЧС и текущем местоположении мобильного абонента отправляет оповещения. Мобильный абонент может получать речевую, графическую, текстовую и видео информацию.

Главная часть приложения для оповещения мобильного абонента — это компонент, который предоставляет пользователям возможность настраивать параметры оповещений, управлять настройками и просматривать историю оповещений. Приложение может устанавливаться абонентам (пользователям) по подписке или при заключении договора с оператором связи на предоставление услуги связи. Обязательное условие для использования системы оповещения на основе местоположения - периодическая отправка обновлений местоположения абонентом (в зашифрованном виде).

На рисунке приведена модель системы оповещения населения с функцией определения местоположения мобильных абонентов.



Модель системы оповещения населения с функцией определения местоположения мобильных абонентов

Предполагается, что мобильные абоненты системы оповещения населения будут получать информацию оповещения в случае, если они находятся на территории, подверженной ЧС.

Каждая система оповещения населения имеет зону действия, границы которой определяются в соответствии с законодательством. В случае угрозы или возникновения ЧС территория, подверженная угрозе возникновения или возникшей ЧС определяется территория, которая может быть подвержена рискам ЧС. Данная территория условно разбивается на более мелкие участки, называемые «ячейками оповещения». Данные о местонахождении или перемещении мобильного абонента («ячейка абонента») отслеживаются регулярно в режиме реального времени трекером местоположения и передаются на сервер оповещения мобильных абонентов, и сравниваться с «ячейками оповещения». При их совпадении необходимо оповещение абонента. Модель системы оповещения, основанной на определении местоположения с возможностью поиска пользователя, принимает во внимание вероятность того, что ячейки оповещения составляют множество, являющееся зоной ЧС. Техника встраивания графа используется для присвоения кодов ячейкам оповещения таким образом, чтобы пользователи знали о вероятности того, что они будут предупреждены. С этой целью используется адаптивный алгоритм Хаффмана [4], являющегося модификацией обычного алгоритма Хаффмана сжатия сообщений. Он позволяет не передавать таблицу кодов и ограничиться одним проходом по сообщению, как при кодировании, так и при декодировании. Данный общий подход заключается в использовании двоичной минимизации идентификаторов ячеек [3]. Также можно использовать подход к кодированию переменной длины. В этом случае важно использовать меньше битов представления для областей с высокой вероятностью. Для этой цели будем использовать распределение Пуассона [5], чтобы смоделировать количество событий, происходящих в фиксированном интервале времени или пространства, при условии, что эти события происходят с некоторой фиксированной интенсивностью и независимы друг от друга. Характеристики распределения Пуассона:

k - количество событий, происходящих в любом фиксированном интервале времени или пространства

λ - среднее число событий, происходящих в данном интервале;

вероятность того, что произойдет k событий в данном интервале, равна:

$$P(k) = (e^{-\lambda} * \lambda^{k})/ k!,$$

где e - основание натурального логарифма.

Из распределения Пуассона можно определить вероятность наличия количества ячеек оповещения и абонентов в конкретной зоне ЧС. Такой подход обеспечивает значительное сокращение времени оповещения, так как при совпадении ячеек оповещения и абонента происходит генерация токена (ключа на оповещение). В некоторых случаях данный метод может быть ограничен отсутствием систематического способа получения значений вероятности возникновения ЧС для определения зоны оповещения. Но в случае определения геоданных абонента, он будет своевременно оповещен.

Таким образом, предлагаемая модель системы оповещения с функцией определения местоположения мобильных абонентов:

обладает рядом преимуществ по сравнению с действующей системой оповещения населения:

точность и надежность определения местоположения;

использование геолокации для определения местоположения пользователей, что позволяет создать более индивидуализированные и целенаправленные (персонифицированные) сообщения для экстренного оповещения;

интеграция системы оповещения на основе определения местоположения с другими технологиями, такими как мобильные приложения и датчики повысит функциональность системы в целом;

позволяет обеспечить быструю и эффективную реакцию на ЧС, минимизировать риски для жизни и здоровья людей и обеспечить им необходимую информацию для действий в любой ситуации.

Персонализация оповещения населения — это важный шаг в направлении повышения эффективности оповещения населения и обеспечения безопасности его жизнедеятельности.

Список литературы

1. Информирование населения в чрезвычайных М., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023 г. 108 с.

2. Отчет о научно-исследовательской работе «Научные исследования по развитию региональных, муниципальных и локальных систем оповещения в целях обеспечения гарантированного оповещения населения об угрозе возникновения или о возникновении чрезвычайной ситуации» (заключительный), М., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023. 145 с.

3. Кудрина М.А., Кудрин К.А., Дегтярева О.Д., Сопченко Е.В., Адаптивный алгоритм Хаффмана сжатия информации [Электронный ресурс] URL: www.cyberleninka.ru (дата обращения: 10.10.2024).

4. Леонова Е.М., Леонова А.Н., Наумова Т.Е., Котлчяков Д.С. О возможности оповещения населения на основе определения его местоположения с использованием кодов Хаффмана // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, №4. 2024.

5.Вентцель Е.С., Овчаров А.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. 2-е изд. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.

Леонова Елена Михайловна, старший научный, elenaleon@mail.ru, Россия, Москва, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий),

Леонова Алла Николаевна, научный сотрудник, all_leo@mail.ru, Россия, Москва, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий),

Котлячков Дмитрий Сергеевич, студент, d_kotlyachkov@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ON THE ISSUE OF PERSONALIZATION OF PUBLIC NOTIFICATION

E.M. Leonova, A.N. Leonova, D.S. Kotlyachkov

This article discusses the issues of personalization of public notification, describes the advantages of this technology of public notification, emphasizes the importance of effective warning systems to ensure the safety of the population in emergency situations such as natural disasters, man-made accidents and other cataclysms.

Key words: digital technologies, public notification, personalization of public notification, emergencies, life safety.

Leonova Elena Mikhailovna, senior researcher, elenaleon@mail.ru, Russia, Moscow, All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Federal Center for Science and High Technologies),

Leonova Alla Nikolaevna, researcher, all_leo@mail.ru, Russia, Moscow, All-Russian Scientific Research Institute on Civil Defense and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Federal Center for Science and High Technologies),

Kotlyachkov Dmitry Sergeevich, student, d_kotlyachkov@mail.ru, Russia, Moscow, National Research Nuclear University "MEPhI"

УДК 004.415.25
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-376-377

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРАВИЛ БАЛАНСА РОЛЕВОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ ПЕРСОНАЖА КОМПЬЮТЕРНОЙ ИГРЫ

Г.А. Тюкаева, Л.Б. Филиппова, Р.А. Филиппов, А.А. Кузьменко

В данной статье говорится о необходимости баланса игр, приводятся пара методик. На основе некой ролевой игры представляется порядок и способ формирования математического баланса на основе формул. В качестве примера описывается ряд характеристик, составляется схема их взаимосвязи, после чего приводится и описывается несколько формул расчёта и методы их формирования. В конце статьи представляется полный набор формул для математического баланса ролевой системы на примере персонажа компьютерной игры.

Ключевые слова: разработка игр, баланс игр, математические правила, расчёт приоритета.

Введение. Игры — это популярный вид досуга современного человека, которые имеют богатую историю. Так можно говорить о детских играх или более сложных настольных играх, но в век информационных технологий нельзя забывать и о видеоиграх: мобильных, компьютерных и игр для приставок.

Игры отличаются по сложности, в некоторых правила можно объяснить одним предложением из-за небольшого количества характеристик, в других существуют целые энциклопедии, поясняющие правила взаимодействия. Одними из наиболее сложных правил обладают игры жанра RPG (Role-Playing Game) и не столь значимо идёт ли речь о настольной или компьютерной версии, так как сложность обуславливается большим количеством характеристик, способностей и их взаимодействием в различных игровых ситуациях [1,6]. Именно по этой причине, рассмотрение игрового баланса будет производится для игры жанра RPG, как наиболее наглядное.

Основная суть баланса в игре - сохранение её привлекательности для пользователя. Иными словами, популярность игр в целом обусловлена рядом причин, к примеру, получение удовольствия от побед над другими или награды за выполненное задание[8]. Если эти достижения будут даваться слишком легко, то обесценится их значимость и игрок потеряет интерес, ему станет скучно, а если же слишком сложно, то игрок будет часто испытывать негативные эмоции от проигрыша, невозможность пройти [2]. Обе эти ситуации негативно скажутся на популярности продукта, именно по этой причине важно соблюдать баланс. При этом большинство имеющихся характеристик в игре так или иначе взаимосвязаны [3].

Таким образом, целью данного исследования является разработка математических правил баланса ролевой системы на примере персонажа компьютерной игры

Теория. Различные ролевые системы имеют большое количество характеристик из разных взаимосвязанных между собой параметров[7]. Существует ряд способов расчёта характеристик, к примеру, баланс персонажа исходя из его образа. [4] Другой вариант, идти от характеристик: определить какую-то стартовую (можно с помощью первого метода) и рассчитывать, строить зависимости и последовательности другие. Этот метод более точный, имеет точки опоры. Именно он и будет рассмотрен в статье.

Необходимо также упомянуть, что характеристики персонажа взаимодействуют с окружающим миром (прорисовка карты и размещение элементов на ней), характеристиками самого игрока и врагов, встречающихся на указанной карте. [5,9,10] Кроме того, система ролевая, то есть учитывает прохождение некой истории, а, следовательно, выполнение заданий, связанных с сюжетом, основным или побочными также необходимо учитывать.

Для полноты картины, стоит упомянуть, что в играх бывает ряд характеристик, которые не поддаются сравнению и балансу относительно подобных у других персонажей. Тут всё субъективно и единственное правило, что способность не должна давать абсолютное преимущество, то есть чем сильнее способность, тем более значимый недостаток она должна иметь. В противном случае происходит нарушение баланса и потеря смысла в улучшении характеристик персонажа.

Данные и методы. Система, для которой разрабатываются математические правила - это игра, где у пользователя есть аккаунт с определёнными, увеличивающимися в процессе прохождения показателями. Также есть ряд персонажей (у пользователя в начале один стартовый), которые также имеют ряд свойств с различными значениями.

Таким образом получается, что есть характеристики присущие именно игроку, общие для любого выбранного персонажа, а также существует группа характеристик, относящаяся именно к персонажам. Кроме этого, есть характеристики врага.

Рассмотрим по несколько основных характеристик из каждой группы и их влияние друг на друга.

Рассмотрим взаимосвязь трёх основных групп характеристик:

1. Характеристики игрока: *Lvl* – уровень игрока. Не зависит от выбранного персонажа; *R* – ранг игрока. Также является единой характеристикой. Повышается при достижении определённого *Lvl*.

2. Характеристики персонажа: Lvl_{ch} – уровень персонажа. Влияет только на конкретного персонажа; *Hp* – здоровье выбранного персонажа. Это числовая характеристика; *Dm* – урон персонажа. Собирательная характеристика, зависящая от ряда факторов.

3. Характеристики врагов: Hp_e – здоровье врагов; Dm_e – урон врагов.

На рисунке 1 представлены связи показателей из каждой группы. Так можно заметить, что ранг влияет на значения здоровья и урона как персонажей, так и врагов. При это на ранг влияет уровень игрока, который также влияет на урон персонажа. А сам уровень повышается в том числе за счёт повышения уровня персонажа. Также на рисунке 1 видна связь между характеристиками персонажа и врагов: урон персонажа уменьшает здоровье врагов, и наоборот, урон врагов влияет на здоровье персонаже при столкновении. Уровень персонажа при повышении увеличивает показатели здоровья и урона персонажа.

После установления общих взаимосвязей рассмотрим группу характеристик персонажа, затрагивая лишь влияющие на них значения из других групп, без описания их получения.

Модель характеристик, на которые может влиять игрок тем или иным образом, значительно больше тех, что были представлены ранее. Поэтому перед началом описания взаимосвязей необходимо рассмотреть и расшифровать полный список характеристик присущих персонажам:

Lvl – уровень игрока, *R* – ранг игрока, Lvl_{ch} – уровень персонажа, *Hp* – здоровье выбранного персонажа, *Atk (attack)* – сила атаки, *L (luck)* – удача, *Def (defence)* – защита, *T (talent)* – талант, *Am (amulet)* – оберег, который может выражаться в числовом или в формате процента от *const* и повышает значение других характеристик. Значение параметра оберег $Am = \{Am_{Def}$ (защиты), Am_L (удача), Am_{Hp} (здоровья), Am_{Fig} (одного или нескольких показателей из группы Fig)*}*

Fig (fighting) – группа характеристик персонажа, влияющая на урон от оружия: *Frc (force)* – сила, *Int (intelligence)* – интеллект, *Dex (dexterity)* – ловкость, *Wp (willpower)* – сила воли/воля. *En (endurance)* – выносливость. Комбинация характеристик зависит от типа оружия.

W_{Atk} *(weapon)* – сила атаки оружия, Lvl_w – уровень оружия, *V* – скорость атаки, *Dis (distance)* – дальность атаки, *Tp (type)* – тип оружия.

Персонажи в бою используют определённое оружие одного из 5 типов. Значение параметра тип оружия $Tp = \{Tp_1, Tp_2, Tp_3, Tp_4, Tp_5\}$.

Un (uniqueness) – уникальность данного оружия. Значение параметра уникальности $Un = \{Un_1$ *(0,3),* Un_2 *(0,5),* Un_3 *(0,7),* Un_4 *(0,9),* Un_5 *(1,2)}.*

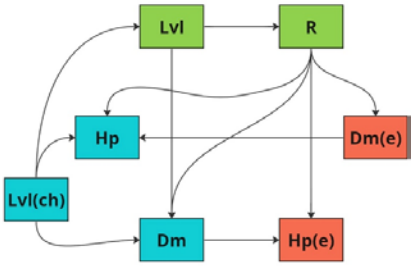


Рис. 1. Взаимосвязь основных характеристик групп

При этом, каждый показатель влияет на другой (рис. 2) в каком процентном соотношении или с учётом некой формулы. Приведём и рассчитаем эти формулы и значения.

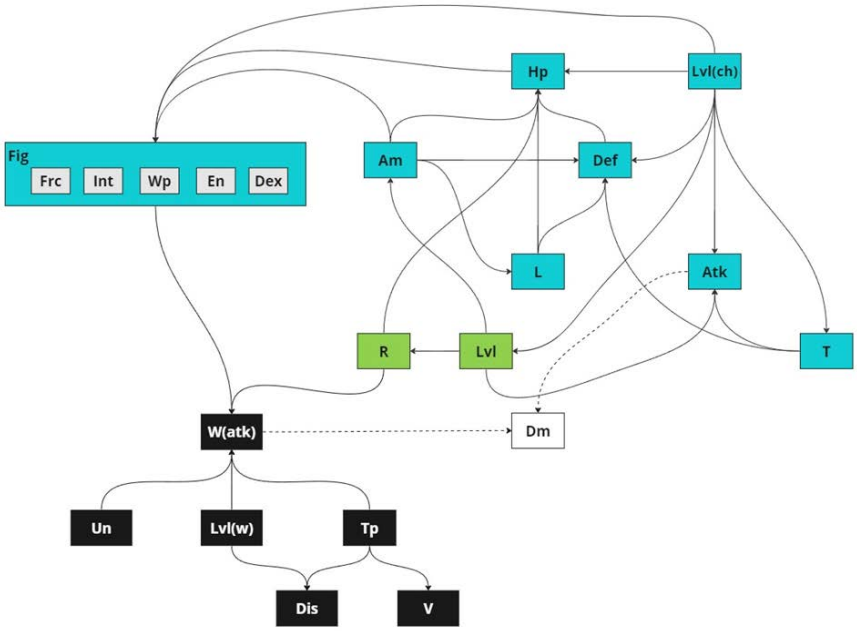


Рис. 2. Взаимосвязь характеристик персонажа, оружия и игрока

Формирование формул происходит с учётом взаимосвязей, представленных на рисунке 2. Самым простым примером будет являться формула для расчёта обобщающей характеристика персонажа — урона (1).

$$Dm = W_{Atk} + Atk, \quad (1)$$

Однако, бывают случаи, когда влияние одного свойства на другое не в виде открытого добавления, а в виде множителя (иногда влияющая характеристика представлена в процентах) для начального значения искомого, что снижает силу влияния. Примером подобной формулы может служить расчёт силы атаки оружия (2).

$$W_{Atk}=const*(1+R+Lvl_w)*(1+Un+Fig_{Tp}), \quad (2)$$

В представленной формуле (2), есть характеристика Fig_{Tp}, которая показывает влияние характеристик группы *Fig* на урон оружием в соответствии с его типом. Для этого необходимо применить метод парных сравнений. Значение результатов сравнения выставляются разработчиком игры согласно фундаментальной шкале, где от 1 до 9 значимость предпочитаемых силовых характеристик. С помощью данной шкалы необходимо составить матрицы для

каждого типа оружия. Расчёт приоритетов на основе матрицы парных сравнений производится с помощью метода собственного вектора. При расчёте W – вектор приоритетов элементов. В качестве примера подобного действия, в таблице 1 приведена матрица для первого типа оружия.

Таблица 1

Матрица парных сравнений, расчёт вектора приоритетов для Tp1

	Frc	***Int***	***Dex***	***Wp***	***En***	***W***
Frc	1	1/5	1/9	1/7	1/3	0.033
Int	5	1	1/5	1/3	3	0.129
Dex	9	5	1	3	7	0.513
Wp	7	3	1/3	1	5	0.261
En	3	1/3	1/7	1/5	1	0.063
λ_{max}= 5.237; *CI=0.059*; *CR*=0.053						

На основе полученных приоритетов составлена сводная таблица 2 влияния, где по горизонтали тип оружия, а по вертикале характеристики.

Таблица 2

Влияние характеристик Fig

	Frc	***Int***	***Dex***	***Wp***	***En***
Tp_1	0.033	0.129	0.513	0.261	0.063
Tp_2	0.261	0.129	0.063	0.033	0.513
Tp_3	0.513	0.033	0.063	0.261	0.129
Tp_4	0.129	0.261	0.063	0.513	0.033
Tp_5	0.033	0.513	0.261	0.129	0.063

После получения коэффициентов влияния для каждого типа, была составлена формула (3), в которой для определённого типа оружия рассчитывается силовая характеристика, с учётом данных приоритета.

$$Fig_{Tp} = Frc * W_{Frc} + Int * W_{Int} + Dex * W_{Dex} + Wp * W_{Wp} + En * W_{En}, \quad (3)$$

Теперь спустимся ещё на уровень ниже и рассмотрим получения значения Frc (необходимо уточнить, что схема расчёта для всех характеристик группы Fig идентична).

Необходимо начать с наличия влияния *Hp* на группу характеристик *Fig* и указать, что *Hp* в игре выражается в количественном, а не процентном значении (к примеру, Hp = 10000 усл. ед.) и это значение зависит от ряда параметров и может меняться в процессе игры. Поэтому, для удобства расчётов при указании влияния *Hp* на другие характеристики будут использоваться проценты от значения данного показателя.

В таблице 3 можно увидеть, что при значении здоровья в пределах от 100% до 81% все характеристики сохраняют свои показатели в полном объёме. Однако, уже при значении от 80% до 65% начинают снижаться и первым начинает выносливость. На каждом следующем из четырёх оставшихся промежутков начинает снижаться один из показателей. Необходимо отметить, что чем позже по шкале уменьшения здоровья начинает изменяться характеристика группы *Fig,* тем больший у неё шаг. К примеру, если показатель выносливости понижается на 10% каждый промежуток, то показатель ловкости уже на 12%, а воли сразу на 45%. Подобная вариабельность уравняет шансы игроков, использующих разных персонажей.

Таблица 3

Влияние значения Hp на группу характеристик Fig

HP% / **Fig**	**100-81**	**80-65**	**64-49**	**48-33**	**32-17**	**16-1**
Frc	100%	100%	100%	100%	75%	50%
Int	100%	100%	100%	83%	66%	49%
Dex	100%	100%	88%	76%	64%	52%
Wp	100%	100%	100%	100%	100%	55%
En	100%	90%	80%	70%	60%	50%

Исходя из приведённой таблицы 3 и схемы взаимосвязей составляется формула расчёта *Frc* (4).

$$Frc = k * (const_{ch} + Lvl_{ch} * const_{ch} + Am_{Fig}), \quad (4)$$

где *k* – процент влияния характеристики *Hp*.

Стоит обратить внимание на то, что в отличие от других, формула (4) часто применяется, так как эти значения пересчитываются при любом игровом изменении показателя здоровья.

И последним важным моментом при составлении формул является влияние таких характеристик как Lvl_{ch}, *Lvl, R,* Lvl_w. Их влияние изменяются с увеличением показателя. К примеру, для формулы (4) необходимо значение влияние на *Frc* Lvl_{ch}. Для его получения необходимо составить зависимость, где каждый диапазон увеличения уровня (в данном случае шаг диапазона равен 5) имеет значение a_n, рассчитывающееся по определённой формуле (в данном случае, по формуле (5), где *n* – это номер диапазона, а первый член последовательности равен 0). Это значение может быть одинаковым для расчёта нескольких характеристик. И на основе данных значений будет рассчитываться величина влияния конкретного параметра, в данном случае, любой характеристики группы *Fig* для которой используется показательная функция, формула (6).

$$a_n = 0{,}6 + (n - 1) * 0{,}2, \quad (5)$$

$$1{,}9\text{^}a_n \quad (6)$$

Для наглядности применения представленных формул, ниже приведена таблица 4. Расчёт показателей влияния происходит по формулам элементарных функций, в основном показательных и иногда логарифмических, в зависимости от необходимой скорости возрастания показателя.

Таким образом формируются все математические правила баланса силы персонажа. Представленные формулы связаны между собой и их итоговый значения зависят от пользователя, его выбора и получившейся комбинации: персонажа, оружия, оберегов и т.д.

Таблица 4

Влияние характеристики Lvl_{ch}

Lvl_{ch}	**Диапазон уровня**	**1-5**	**6-10**	**11-15**	**16-20**	**21-25**	**26-30**	**31-35**
Обоз	**Формулы расчёта**	**Рассчитанные значения**						
	$\boldsymbol{a_n = 0,6 + (n-1) * 0,2}$	**0**	**0,6**	**0,80**	**1,00**	**1,20**	**1,40**	**1,60**
Fig	$\boldsymbol{1,9\text{^}a_n}$	1,0	1,5	1,7	1,9	2,2	2,5	2,8

Полученные результаты. В качестве результатов, можно привести таблицу 5 соответствия характеристик и их формул. В ней перечислены основные характеристики и сформированные для них формулы расчёта, так чтобы были учтены все связи и показатели находились в балансе.

Таблица 5

Сводная таблица расчёта характеристик

Обозначение	**Формула**
Lvl_{ch}	Повышается игроком
Hp	$Hp = 0{,}66 * (const_{ch} * (1 + R + Lvl_{ch} + \frac{L}{100} + \frac{Def}{100}) + Am_{Fig})$,
Atk (attack)	$Atk = 0{,}6 * t * const_{ch} * (1 + Lvl + Lvl_{ch} + \frac{T}{100})$, где t – это специальный множитель, по умолчанию равный 1. Значение этого множителя зависит от уникальных способностей персонажа.
Def (defence)	$Def = const_{ch} * (1 + Lvl_{ch} + \frac{L}{100} + \frac{T}{100}) + Am_{Def}$,
L (luck)	$L = const_{ch} + Am_L$
T (talent)	$T = const_{ch} * (1 + Lvl_{ch})$
Am (amulet)	$Am = \{Am_{Def}, Am_L, Am_{Hp}, Am_{Fig}\}$ $Am = const * (1 + Lvl)$
Fig (fighting)	$Fig = k * (const_{ch} + Lvl_{ch} * const_{ch} + Am_{Fig})$
Dm	$Dm = W_{Atk} + Atk$
W_{Atk} *(weapon)*	$W_{Atk} = 0{,}017 * const * (1 + R + Lvl_w) * (1 + Un + Fig_{Tp})$ $Fig_{Tp} = Frc * W_{Frc} + Int * W_{Int} + Dex * W_{Dex} + Wp * W_{Wp} + En * W_{En}$
Dis (distance)	$Dis = \{Dis_{Tp1}, Dis_{Tp2}, Dis_{Tp3}, Dis_{Tp4}, Dis_{Tp5}\}$ $Dis = const * (1 + Lvl_w)$
Tp (type)	$Tp = \{Tp_1, Tp_2, Tp_3, Tp_4, Tp_5\}$
Un (uniqueness)	$Un = \{Un_1, Un_2, Un_3, Un_4, Un_5\}$ $Un_1 = 0{,}3;\ Un_2 = 0{,}5;\ Un_3 = 0{,}7;\ Un_4 = 0{,}9;\ Un_5 = 1{,}2$

Необходимо учитывать, что недостаточно просто составить формулы, их необходимо проверить, то есть рассчитать по ним баланс. И уже после пары первых расчётов, можно заметить неточности, а именно, слишком быструю или слишком медленную скорость возрастания значений характеристик при изменении других параметров. В связи с чем необходимо ввести такие поправочные коэффициенты, которые исправят данную ошибку. Для представленного математического баланса подобные коэффициенты понадобились для формул расчёта силы атаки оружия (W_{Atk}), здоровья (Hp) и атаки (Atk).

Заключение. Таким образом, вся математическая модель баланса боевой системы персонажа в первую очередь зависит от проектируемой ролевой игры, её механик и характеристик, которые в свою очередь могут формироваться на основе сюжета. Однако, практически во всех ролевых играх существуют общие характеристики, обязательные к наличию у персонажа – это здоровье и урон, а также сила атаки и оружия. Отталкиваясь от основных характеристик, их составных частей и отношений удобно построить схему взаимосвязей.

Кроме того, необходимо помнить, что любой математический баланс требует тестирования, а именно, применения в игре и получения обратной связи от игроков. Причем количество участвующих в тестировании игроков прямо влияет на качество баланса, Только большое количество тестов позволит довести баланс до нужной точки, так как ощущения пользователей и дополнительные, неучтённые в математических расчетах, параметры могут оказывать на игру влияние.

Список литературы

1. Подвальный М.А. Компьютерная ролевая игра [В Интернете] // Большая Российская энциклопедия. 08 июня 2022 г. [Электронный ресурс] URL: https://bigenc.ru/c/komp-iuternaia-rolevaia-igra-5d8e86 (дата обращения: 10.05.2024).
2. Уточкин В.Н., Сахнов К.С. Хочу в геймдев! Основы игровой разработки для начинающих. Москва: Бомбора, 2022. С. 224.
3. Баланс в играх или как достичь недостижимой цели? // Habr. [Электронный ресурс] URL: https://habr.com/ru/articles/709012 (дата обращения: 10.05.2024)
4. Руководство по игровому балансу. Часть 1 // DTF. [Электронный ресурс] URL: https://dtf.ru/gamedev/1801539-rukovodstvo-po-igrovomu-balansu-chast-1 (дата обращения: 10.05.2024).
5. Гимельрейх Сергей Методология балансировки игр // Gillion. [Электронный ресурс] URL: https://gdcuffs.com/balance-methods (дата обращения: 10.05.2024).
6. Development and study of the model for epidemic spread / A. V. Ivanova, A. S. Sazonova, A. A. Kuzmenko, L. B. Filippova // III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021), Krasnoyarsk, 28 мая 2021 года. Vol. 2899. Krasnoyarsk, Russia: CEUR-WS, 2021. P. 9-16. DOI 10.47813/dnit-mip3/2021-2899-9-16.
7. Теория и системы управления: лабораторный практикум / А. С. Сазонова, Л. Б. Филиппова, Р. А. Филиппов [и др.]. Брянск : Брянский государственный технический университет, 2017. 46 с.

8. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ: учебное пособие / В. И. Аверченков, А. А. Жолобов, Ж. А. Мрочек [и др.]. Том Часть 2. 2-е издание, стереотипное. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2012. 212 с.

9. Экономическая безопасность в региональных социально-экономических системах / Е. Э. Аверченкова, А. В. Аверченков, Ю. А. Леонов [и др.]. Москва : Общество с ограниченной ответственностью "ФЛИНТА", 2019. 157 с.

10. Аверченков В.И. Программный комплекс определения величины коррекции на инструмент для обрабатывающих центров с датчиками активного контроля / В. И. Аверченков, Л. Б. Филиппова, Л. И. Пугач // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-1. С. 70-78.

Тюкаева Галина Александровна, ассистент, miss.tolossky@yandex.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Филиппова Людмила Борисовна, канд. техн. наук, доцент, libv88@mail.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Филиппов Родион Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, redfil@mail.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Кузьменко Александр Анатольевич, канд. биол. наук, доцент, alex-rf-32@yandex.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL RULES FOR THE BALANCE OF A ROLE-PLAYING SYSTEM USING THE EXAMPLE OF A COMPUTER GAME CHARACTER

G.A. Tyukaeva, L.B. Filippova, R.A. Filippov, A.A. Kuzmenko

This article talks about the need for game balance, and provides a couple of techniques. On the basis of a certain role-playing game, the order and method of forming a mathematical balance based on formulas are presented. As an example, a number of characteristics are described, a diagram of their relationship is drawn up, after which several calculation formulas and methods of their formation are given and described. At the end of the article, a complete set of formulas for the mathematical balance of the role-playing system is presented using the example of a computer game character.

Key words: game development, game balance, mathematical rules, priority calculation.

Tyukaeva Galina Alexandrovna, assistant, miss.tolossky@yandex.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Filippova Lyudmila Borisovna, candidate of technical sciences, docent, libv88@mail.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Filippov Rodion Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, redfil@mail.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Kuzmenko Alexander Anatolyevich, candidate of biological sciences, docent, alex-rf-32@yandex.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University

УДК 519.852
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-380-381

СВЯЗЬ ПРИРАЩЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ФУНКЦИИ ПОТЕРЬ С ИЗМЕНЕНИЕМ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

С.И. Носков, А.Р. Чекалова

В статье исследуется кусочно-линейная регрессионная зависимость, параметры которой идентифицируются с помощью метода наименьших модулей. Он состоит в минимизации суммы абсолютных отклонений фактических и расчетных значений зависимой переменной и сводится к задаче линейно-булева программирования. Сформулирована задача вычисления границ изменения оценок параметров модели, если допустить малое увеличение оптимального значения функции потерь при неизменности суммарной отдачи от независимых факторов. Показано, что для выявления границ соответствующих диапазонов необходимо решить серию задач линейно-булева программирования. Построена двухфакторная кусочно-линейная регрессионная модель выручки ПАО «Северсталь». В качестве независимых переменных выделены производство сортового проката и труб большого диаметра. При этом оказалось, что разница между верхними и нижними границами обоих диапазонов для значений параметров одинакова.

Ключевые слова: кусочно-линейная регрессионная модель, оценки параметров, метод наименьших модулей, диапазоны, функция потерь, сталелитейная компания.

Применение методов регрессионного моделирования сложных объектов не всегда ограничивается только построением их качественных моделей для решения конкретных прикладных задач, а сопровождается анализом поведения соответствующих функций потерь и свойств полученных оценок параметров. Так, в работе [1] изучаются

приложения и обобщения простого метода оценки, который обеспечивает экспоненциальную концентрацию при распределениях с тяжелыми хвостами, предполагая только ограниченные моменты низкого порядка. Показано, что этот метод можно использовать для приблизительной минимизации гладких и сильно выпуклых функций потерь, в частности для линейной регрессии по методу наименьших квадратов. В [2] предлагается механизм обеспечения устойчивости для регрессионных моделей сверточных нейронных сетей на основе применения специальной функции потерь, базирующейся на расхождении Кульбака-Лейблера. Предложенный подход применяется для оценки многолучевости глобальной навигационной спутниковой системы GNSS, где параметры многолучевого сигнала необходимо оценивать по выходным изображениям коррелятора. Статья [3] посвящена описанию единой стратегии построения, выбора и оценки эффективности методов оценивания оценок параметров регрессии в условиях цензурирования на основе выбора функции потерь для полной структуры данных. В публикации [4] показано, что информационный критерий об отклонениях является приближением к функции потерь со штрафом, полученным на основе аргумента перекрестной проверки. Это приближение справедливо только в том случае, когда эффективное число параметров модели намного меньше числа независимых наблюдений. В [5] представлен новый класс робастных оценок для модели линейной регрессии. Они представляют собой взвешенные оценки метода наименьших квадратов, веса которых адаптивно вычисляются с использованием эмпирического распределения остатков исходной устойчивой оценки. В исследовании [6] показано, как байесовский вывод для моделей регрессии переключения и их обобщений может быть достигнут путем спецификации функций потерь, которые преодолевают проблему переключения меток, общую для всех моделей смесей. В исследовании [7] предлагаются штрафные потери Хьюбера с расходящимся параметром, чтобы уменьшить систематические ошибки, создаваемые традиционными потерями. В работе [8] проблема оценки неплоской функции, которая включает как крутые, так и плавные изменения, решается с помощью построения многомасштабной регрессии опорных векторов в комбинированном пространстве признаков, которое неявно определяется набором ядер, инвариантных к трансляции. В статье [9] устанавливаются неасимптотические границы глубоких нейронных сетей для общего класса непараметрических функций потерь типа регрессии, который включает в себя в качестве особых случаев метод наименьших квадратов, логистическую регрессию и другие обобщенные линейные модели. В [10] подробно рассматривается хорошо известная взаимосвязь между гауссовскими процессами и методами опорных векторов при некоторых предположениях для выпуклых функций потерь. При этом основное внимание уделяется получению доказательств и аппроксимации шкалы ошибок для моделей регрессии. Формула шкалы погрешностей выводится на основе функции потерь, нечувствительной к метрике.

Интересные результаты получены в работах: [11] (задача прогнозирования временных рядов при несимметричных функциях потерь), [12] (применение квадратичной функции потерь для метода опорных векторов при построении регрессионных моделей), [13] (робастный алгоритм прогнозирования, основанный на итерационно вычисляемых М-оценках параметров гипотетической функции регрессии при специальном выборе функции потерь), [14] (задачи классификации и регрессионного моделирования на основе адаптивного выбора различных моделей машинного обучения на сегментах выборки), [15] (восстановление регрессионной зависимости при наличии ограниченной обучающей выборки на основе минимизации функционала риска с использованием минимаксной стратегии).

Построение диапазонов изменения оценок параметров кусочно-линейной регрессионной модели. Рассмотрим кусочно-линейную регрессионную модель (уравнение):

$$y_k = min\{a_1 x_{k1}, a_2 x_{k2}, \dots, a_m x_{km}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,n}, \tag{1}$$

где y – зависимая (выходная) переменная, x_i, $i = \overline{1,m}$ – независимые (входные) переменные, a_i, $i = \overline{1,m}$ – идентифицируемые параметры, $\varepsilon_k, k = \overline{1,n}$ – ошибки аппроксимации, n – количество наблюдений (длина выборки данных).

Отличительным привлекательным свойством модели (1) (см., например, [16-18]) является то, что значение выходной переменной определяется значением лимитирующего входного фактора (на котором сработал минимум), при этом увеличение других переменных не приводит к изменению выходной переменной.

В том случае, когда оценивание параметров уравнения (1) производится в соответствии с методом наименьших модулей (МНМ) путем минимизации функции потерь

$$\mathrm{I}(a) = \sum_{k=1}^{n} |\varepsilon_k|, \tag{2}$$

эта задача сводится [18] к задаче линейно-булева программирования (ЛБП) следующим образом.

Введем следующие обозначения:

$$u_k = \begin{cases} \varepsilon_k, & \varepsilon_k > 0 \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$v_k = \begin{cases} -\varepsilon_k, & \varepsilon_k < 0 \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$\sigma_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{если минимум в (1) для } k-\text{го наблюдения реализовался} \\ & \text{на } i-\text{ой компоненте} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$z_k = min\{a_1 x_{k1}, a_2 x_{k2}, \dots, a_m x_{km}\}, k = \overline{1,n}.$$

Таким образом, справедливы равенства:

$$\varepsilon_k = u_k - v_k, \qquad |\varepsilon_k| = u_k + v_k, \qquad u_k v_k = 0, \qquad k = \overline{1,n}. \tag{3}$$

С учетом введенных обозначений задача минимизации функции потерь (2) сводится к следующей задаче ЛБП:

$$\sum_{k=1}^{n} (u_k + v_k) + \rho \sum_{i=1}^{m} a_i \to min, \tag{4}$$

$$z_k + u_k - v_k = y_k, k = \overline{1,n}, \tag{5}$$

$$z_k \le a_i x_{ki}, k = \overline{1,n}, i = \overline{1,m}, \tag{6}$$

$$a_i x_{ki} - z_k + \mathrm{M}\sigma_{ki} \le \mathrm{M}, k = \overline{1,n}, i = \overline{1,m}, \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{m} \sigma_{ki} = 1, k = \overline{1,n}, \quad (8)$$

$$u_k \geq 0,\ v_k \geq 0, \quad (9)$$

$$\sigma_{ki} \in \{0,1\}, k = \overline{1,n}, i = \overline{1,m}, \quad (10)$$

Здесь M и ρ - наперед заданные соответственно большое и малое положительные числа.

Обозначим через I^* оптимальное значение функции потерь (2) ($I^*=\sum_{k=1}^{n}(u_k^* + v_k^*)$), а через a^* - соответствующий ему вектор параметров. Заметим, что параметры a_i, $i = \overline{1,m}$ в модели (1) трактуются как отдачи от независимых переменных по отношению к выходному фактору. Так, если она используется как производственная функция, в которой y – выпуск продукции объектом исследования, x_1 – численность персонала, x_2 – стоимость основных фондов (зданий, сооружений, оборудования и т.д.), то a_1 представляет собой производительность труда, а a_2 – фондоотдачу.

Поставим задачу исследовать, каким образом могут измениться оценки параметров модели (1), если допустить некоторое незначительное (на $\Delta I > 0$) увеличение (приращение) I^* при сохранении суммарной отдачи от независимых факторов.

Формально эта задача может быть, следуя [19], сформулирована следующим образом. Введем в рассмотрение множество:

$$\mathrm{A}^* = \{a \in \mathrm{A} \subset R^m |\ \sum_{k=1}^{n}(u_k + v_k) \leq I^* + \Delta I,\ \ \sum_{i=1}^{m} a_i = \sum_{i=1}^{m} a_i^*\},$$

где множество А задано ограничениями (5) – (10).

Необходимо определить m-мерный параллелепипед, в который вписано множество A^*.

Эта задача может быть сведена к $2m$ задачам ЛБП:

$$\min_{a \in \mathrm{A}^*}(a_i + \gamma \sum_{k=1}^{n}(u_k + v_k)), \qquad i = \overline{1,m}, \quad (11)$$

$$\max_{a \in \mathrm{A}^*}(a_i - \gamma \sum_{k=1}^{n}(u_k + v_k)),\ i = \overline{1,m}, \quad (12)$$

где γ – малая положительная константа.

Вторые слагаемые в (11) и (12) обеспечивают выполнение условий (3). Таким образом, решение задач (11) и (12) позволяет определить диапазоны изменения оценок параметров кусочно-линейной регрессионной модели (1) при сделанных допущениях.

Построение кусочно-линейной модели выручки ПАО «Северсталь». Применим описанный выше подход для построения регрессионной кусочно-линейной модели годовой выручки отечественной вертикально-интегрированной горно-металлургической компании «Северсталь». Введем следующие обозначения:

y – выручка, млн. долл.;

x_1 – производство сортового проката, тыс. т.;

x_2 – производство труб большого диаметра, тыс. т.

В качестве информационной базы используем статистическую информацию для выделенных показателей за 2009 – 2021 гг. [20].

Построим вначале кусочно-линейную модель (1), используя специализированную программу [21]:

$$y_k = min\{5.04x_{k1}, 15.208x_{k2}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,13},$$

$$I^* = 66160.$$

Зададим десятипроцентное приращение для оптимального значения функции потерь:

$$\Delta I = 6616.$$

В результате решения задач (11), (12) получим следующие диапазоны изменения оценок параметров:

$$a_1 \in [5.04, 9.109],$$

$$a_2 \in [11.139, 15.208].$$

Таким образом, оптимальное значение параметра a_1^* совпадает с нижней границей соответствующего диапазона, а a_2^* - верхнего. При этом разница между верхними и нижними границами обоих диапазонов одинакова и составляет 4.069.

Заключение. В работе рассматривается кусочно-линейная регрессионная модель, параметры которой оцениваются с помощью метода наименьших модулей, состоящего в минимизации суммы абсолютных отклонений заданных в выборке и вычисленных значений зависимой переменной и сводящегося в этом случае к задаче линейно-булева программирования. Поставлена задача исследовать, каким образом могут измениться оценки параметров модели, если допустить некоторое незначительное увеличение оптимального значения функции потерь при сохранении суммарной отдачи от независимых факторов. Показано, что определение границ соответствующих диапазонов сводится к решению $2m$ задач ЛБП. Построена кусочно-линейная регрессионная модель выручки ПАО «Северсталь».

Список литературы

1. Hsu D., Sabato S. Loss Minimization and Parameter Estimation with Heavy Tails // Journal of Machine Learning Research. 2016. № 17(18). С.1−40.

2. Gonzàlez T., Blais A., Couëllan N., Ruiz C. Distributional loss for convolutional neural network regression and application to parameter estimation in satellite navigation signals // Expert Systems with Applications. 2024. № 5. С. 124682.

3. Molinaro A.M. 1, Dudoit S., van der Laan M. J. Tree-based multivariate regression and density estimation with right-censored data // Journal of Multivariate Analysis. 2004. Т. 90. № 1. С. 154-177.

4. Plummer M. Penalized loss functions for Bayesian model comparison // Biostatistics. 2008. Т. 9. № 3. С. 523–539.

5. Gervini D., Yohai V. J. A class of robust and fully efficient regression estimators // The Annals of Statistics. 2002. № 30(2). С. 583-616.

6. Hurn M., Justel A., Robert C.P. Estimating Mixtures of Regressions // Journal of Computational and Graphical Statistics. 2003. Т. 12. № 1. С. 55-79.

7. Jianqing Fan, Quefeng Li, Yuyan Wang. Estimation of High Dimensional Mean Regression in the Absence of Symmetry and Light Tail Assumptions // Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology. 2017. Т. 79. № 1. С. 247–265.

8. Danian Zheng, Jiaxin Wang, Yannan Zhao. Non-flat function estimation with a multi-scale support vector regression // Neurocomputing. 2006. Т. 70. № 1–3. С. 420-429.

9. Farrell M.H., Tengyuan Liang, Sanjog Misra. Deep Neural Networks for Estimation and Inference // Econometrica. 2021. Т. 89. № 1. С. 181-213.

10. Gao J.B., Gunn S.R., Harris C.J., Brown M. A Probabilistic Framework for SVM Regression and Error Bar Estimation // Machine Learning. 2002. Т. 46. С. 71–89.

11. Черных В.Ю., Стенина М.М. Прогнозирование нестационарных временных рядов при несимметричных функциях потерь // Машинное обучение и анализ данных. 2015. Т. 1. № 14. С. 1893-1909.

12. Попов А.А., Бобоев Ш.А. Построение регрессионных зависимостей с использованием квадратичной функции потерь в методе опорных векторов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2015. № 3 (81). С. 69-78.

13. Маевский В.В., Харин Ю.С. Робастность регрессионного прогнозирования при наличии функциональных искажений модели // Автоматика и телемеханика. 2002. № 11. С. 118-137.

14. Лебедев И.С. Адаптивное применение моделей машинного обучения на отдельных сегментах выборки в задачах регрессии и классификации // Информационно-управляющие системы. 2022. № 3 (118). С. 20-30.

15. Уткин Л.В. Минимаксная стратегия восстановления регрессионной зависимости при непараметрическом оценивании шума // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2010. № 190. С. 197-206.

16. Носков С.И., Лоншаков Р.В. Идентификация параметров кусочно-линейной регрессии // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. 2008. № 6. С. 63-64.

17. Носков С.И. Кусочно-линейная производственная функция погрузки на железнодорожном транспорте // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2022. № 4. С. 72-79.

18. Носков С.И., Жукова М.С., Кириллова Т.К., Купитман Ю.О., Хоняков А.А. Уточнение способов идентификации параметров некоторых кусочно-линейных регрессий // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2023. № 2. С. 75-81.

19. Носков С.И. Вычисление диапазонов изменения оценок параметров линейной регрессионной модели // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2023. № 5. С. 30–37.

20. Носков С.И., Бычков Ю.А. Разработка кусочно-линейной регрессионной модели сталелитейной компании с помощью непрерывной формы метода максимальной согласованности // Инженерный вестник Дона. 2024. № 3 (111). С. 195-203.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617773 Российская Федерация; Носков С.И., Хоняков А.А. Программа построения комбинированной кусочно-линейной регрессионной модели: заявл. 14.04.2022: опубл. 25.04.2022.

Носков Сергей Иванович, д-р техн. наук., профессор, sergey.noskov.57@mail.ru, Россия, Иркутск, Иркутский государственный университет путей сообщения,

Чекалова Александра Романовна, магистрант, chekalova49@gmail.com, Россия, Иркутск, Иркутский государственный университет путей сообщения

THE RELATIONSHIP OF THE INCREMENT OF THE OPTIMAL VALUE OF THE LOSS FUNCTION WITH A CHANGE IN THE ESTIMATES OF THE PARAMETERS OF THE PIECEWISE LINEAR REGRESSION MODEL

S.I. Noskov, A.R. Chekalova

The article examines the piecewise linear regression dependence, the parameters of which are identified using the method of least modules. It consists in minimizing the sum of the absolute deviations of the actual and calculated values of the dependent variable and reduces to the problem of linear Boolean programming. The problem of calculating the boundaries of changes in estimates of model parameters is formulated, assuming a small increase in the optimal value of the loss function while the total return from independent factors remains unchanged. It is shown that in order to identify the boundaries of the corresponding ranges, it is necessary to solve a series of linear Boolean programming problems. A two-factor piecewise linear regression model of Severstal's revenue has been constructed. The production of long products and large diameter pipes are highlighted as independent variables. At the same time, it turned out that the difference between the upper and lower limits of both ranges for parameter values is the same.

Key words: *piecewise linear regression model, parameter estimates, method of least modules, ranges, loss function, steel company.*

Noskov Sergey Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, sergey.noskov.57@mail.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk State Transport University,

Chekalova Aleksandra Romanovna, master's, chekalova49@gmail.com, Russia, Irkutsk, Irkutsk State Transport University

УДК 69.002.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-384-385

ТЯЖЕЛЫЕ МОНТАЖНЫЕ РОБОТЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

В.И. Скель, Б.А. Кайтуков

Рассматривается состояние и перспективы развития автоматизации и роботизации строительной отрасли. Отмечаются особенности строительного производства, ограничивающие проектирование и применение роботов и роботизированных систем. Предлагается продолжить совершенствование строительных технологий под современные возможности робототехники, используя возможности индустрией 4.0.

Ключевые слова: роботизация, автоматизация, строительство, тяжелый робот, точность позиционирования, колебания.

Важным направлением развития строительства является автоматизация и механизация на базе их компьютеризации и роботизации [1]. Автоматизация уже давно внедрена во многих строительных отраслях, в строительных машинах и оборудовании. У роботизации такого внедрения в строительстве пока не наблюдается, что связано с некоторыми особенностями. Например, объекты строительного производства многообразны по назначению, объемам, видам конструкций и материалов, по технологии строительного производства [2,3].

Строительство как отрасль характеризуется низкой производительностью, физически тяжелым, монотонным трудом, повышенным риском для здоровья и жизни работника и тому подобное [4,5]. Эти особенности четко проявляются в связи с необходимостью повышения объемов и качества строительства с минимальными затратами. Решение перечисленных проблем может дать комплексная механизация и автоматизация строительных процессов при интенсивной цифровизации строительства [6,7].

Значительную роль в этом направлении, видимо, может сыграть роботизация, потенциальные возможности которой повлияют на совершенствование строительных технологий. Роботизация строительства в сравнении с другими отраслями промышленности, заводами является наиболее сложной из-за значительных ограничений, присущих строительным технологическим процессам [8]. Попытки внедрения манипуляторов в строительные процессы принимаются многие годы и в разных странах. Однако пока львиная доля продаваемых роботов не относится к строительной отрасли [9,10]. Вместе с тем, по данным отчета, на рынке наблюдается стабильная потребность в роботах и манипуляторах, обусловленная быстрым технологическим прогрессом и растущим спросом на эффективность и безопасность строительства. При этом отмечается, что имеется сдвиг в сторону внедрения полуавтономных и полностью автономных роботов с уменьшением участия человека в опасных работах [11] (рис. 1).

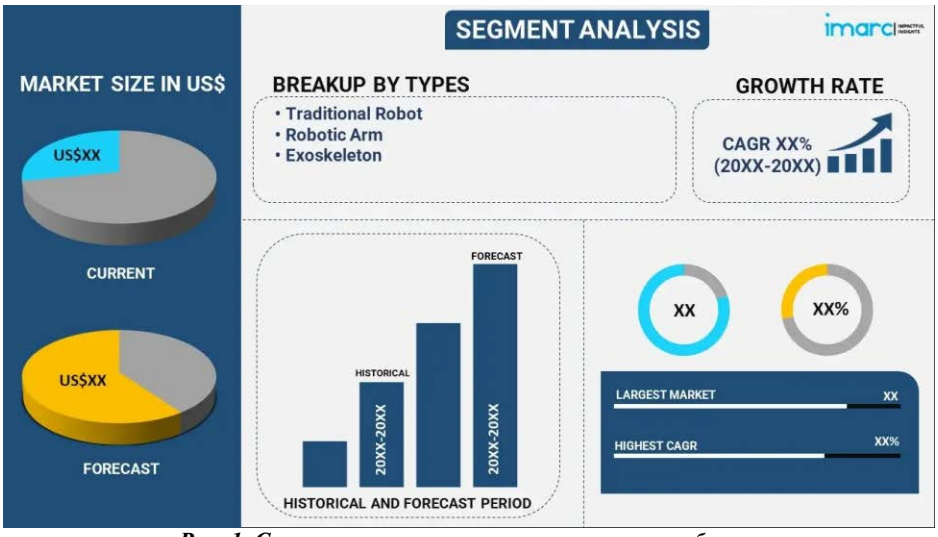


Рис. 1. Сегментация отрасли строительных роботов

В основном применяются традиционные роботы, роботизированная рука и экзоскелет, автономные транспортные средства, дроны для выполнения задач, например, инспекции и мониторинга, сноса строений, кирпичной кладки, 3D-печати домов и их элементов, земляных работ, сварки, погрузо-разгрузочных работ, монтажа бетонных конструкций, отделочных работ, дверей и окон и прочее [9,12] (рис. 2).

Для многих регионов мира ожидается средний рост мирового рынка строительных роботов в 14% в 2024-2032 годах или 504,9 млрд. долларов США к 2032 году (150,4 млрд. долларов США в 2023 году). Правительство Российской Федерации активно финансирует проекты в строительстве, которые ориентированы на внедрение роботов в различные процессы (рис. 3) [9]. Автоматизация таких процессов в настоящее время проводится на основе научно-технического и инженерного подхода, с применением современных методов, соответствующих промышленной революции 4.0 [13]. В частности, в машиностроении появился стандарт о цифровых двойниках, который обязывает их применять на всех стадиях жизненного цикла изделий. Этот стандарт касается и изделий строительного машиностроения, что вынуждает совершенствовать не только производство в широком смысле слова, но и менять подготовку специалистов-механиков для их грамотного участия в проектировании, производстве, эксплуатации и утилизации строительной техники, соответствующей уровню промышленности 4.0 [14].



Рис. 2. Примеры роботов для земляных работ, крана-манипулятора и экзоскелета

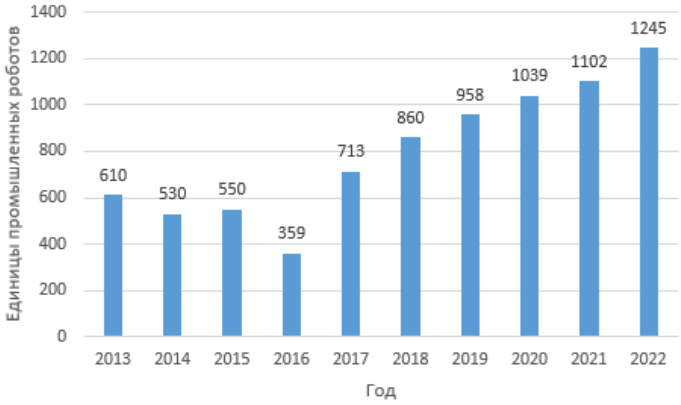


Рис. 3. Изменение количества продаваемых роботов на территории России

Примечательно, что на успех принятия или внедрения строительных роботов влияет не только их технические параметры, но еще и их дизайн [15]. Можно еще отметить исследователей из Флориды (США), которые показали, что зачастую строители воспринимают робота как помощника и товарища по команде [16].

Таким образом, задача роботизации отечественной строительной отрасли является актуальной. Тем более, что во многих странах мира, включая Россию, отмечается нехватка рабочих, особенно квалифицированных. Целью данной работы является обоснование некоторых требований к создаваемым тяжелым манипуляторам и роботам, применяемым в строительстве, и к строительным технологическим процессам.

В статье выполнен анализ работ по тяжелым и сверхтяжелым строительным роботам. Термины «робот» и «манипулятор» вошли в литературу, но их понимание различно. Новый стандарт терминов [17] в определенной степени устраняет это разночтение. Исходя из этого, можем утверждать, что строители уже знакомы с этими определениями стандарта. Строительные машины: экскаваторы, краны – соответствуют термину «манипулятор», так как их рабочие движения соответствуют двигательным функциям руки человека; также к манипуляторам относятся гидрокрановые установки с приводным захватным рабочим органом.

Хорошую оценку строителей получили распределительные стрелы подачи и укладки бетонной смеси, комплексы для выполнения погрузо-разгрузочных и монтажных операций. В строительстве уже рынок предлагает роботов и манипуляторов для всевозможных отделочных работ. Технологические процессы в строительстве при их неоднородности связаны с операциями повышенной сложности. Внедрение робототехнических комплексов в строительство требует комплексного анализа строительных технологических процессов и решения сложных технических задач.

Анализ состояния рынка робототехники показывает, что практически для любого этапа строительства (от проектирования до сноса) уже имеется хотя бы один пример роботов того или иного вида [12,18,19,20]. Однако, несмотря на интенсивное развитие робототехники, а также цифровизации строительства, в развитии роботизации строительной отрасли, включая производство строительных материалов и изделий, сделано еще сравнительно немного [21].

Во многих работах, посвященных применению роботов и манипуляторов в строительстве, перечисляются достоинства и перспективы их внедрения, например, в работах [5,9,11,15,19,22]. Большинство отмечает такие свойства применения робототехники как повышение производительности труда, безопасности ведения работ и качества строительства. Причем часто на первое место ставят обеспечение безопасности работ в связи с огромной травмо-

опасностью и даже гибелью работников строительной отрасли [23]. В данной работе не будут перечислены требования безопасности в связи с наличием большого количества стандартов на эту тему, в которых рассмотрены многие стороны обеспечения безопасности применения роботов и робототехнических систем, их приемка и испытания.

Имеется немало работ и стандартов по общим требованиям к роботам, например, по надежности, конструкции, точности позиционирования, защите от воздействия окружающей среды и так далее [4,24,25]. Однако, в зависимости от назначения строительного робота, кроме соблюдения общих требований, могут быть и часто бывают дополнительные требования, связанные с особенностями строительного производства. Эти особенности касаются, в первую очередь, постоянно меняющейся ситуации как по выполнению непосредственно процесса, для которого предназначен робот, так и действием других машин, роботов и так далее, тем или иным способом влияющих на рабочую зону рассматриваемого робота. Например, есть роботы экскаваторы и бульдозеры (рис. 2), которые хорошо работают в открытом поле, но значительно сложнее в стесненных условиях, например, городской застройки.

Есть группа роботов для выполнения строительных монтажных работ, которые могли бы выполнять соответствующие операции с конструктивными элементами относительно большой массы (сверхтяжелые роботы номинальной грузоподъемностью более 1000 кг) и габаритов. Это накладывает особые ограничения на жесткость системы и на точность позиционирования, которые взаимосвязаны. Эта связь происходит через динамику механической системы. Необходимо учитывать динамику глобальных, региональных и локальных движений исполнительного органа. Динамика этих движений влияет на амплитуду и период колебаний захватного органа и, следовательно, точность и время позиционирования.

Посмотрим возможные необходимые параметры робота для установки, например, железобетонных стеновых панелей. Масса этих панелей может составлять порядка 9 т; длина и высота соответственно порядка 7,5 м и 4,2 м. Допустимые отклонения размеров железобетонных панелей от номинальных составляет 5 – 8 мм. Тогда грузоподъемность робота должна быть примерно не менее 10 т; размеры рабочего пространства должны позволять манипуляцию железобетонными стеновыми панелями, то есть иметь радиус не менее десятка метров; точность позиционирования при действующих допусках на размеры панелей вероятно можно ограничить 2 – 4 мм.

Современные датчики, например, лидары, вполне могут обеспечить требуемую точность установки панелей и даже более высокую, чем 2 мм. Необходимые размеры рабочей зоны тоже можно обеспечить соответствующей кинематической схемой и размерами звеньев манипулятора. Степень подвижности манипулятора с учетом нестабильности условий строительной площадки желательно обеспечить равной 5-6. Грузоподъемность робота в 10 т уже более серьезная проблема с учетом требуемых размеров рабочей зоны: необходимо обеспечить прочность, жесткость и устойчивость конструкции. Как следствие, это приведет к значительной массе всего робота. При этом еще стоит задача обеспечения глобальных и региональных движений робота.

Значительная масса робота и объекта манипулирования ведет к большой инерционности всех движений робота и его звеньев. Колебательная система робота в общем случае является неконсервативной нелинейной и многочастотной. Часто для предварительной оценки такую систему сводят к приведенной одночастотной системе (рис. 4). В зависимости от поставленной задачи в качестве звена приведения может быть выбран, например, захват. В этом случае можно поставить задачу оценки колебательной составляющей перемещений захвата, которые влияют на точность его позиционирования.

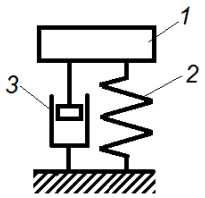


Рис. 4. Приведенная к захвату динамическая система манипулятора: 1 – приведенная масса системы, 2 – приведенная жесткость динамической системы, 3 – приведенное демпфирование

В зависимости от соотношения потерь в системе и частоты собственных колебаний возможны затухающие колебания при небольших демпфирующих свойствах системы; при больших демпфирующих свойствах системы возникает апериодическое движение, и в случае равенства коэффициента демпфирования и собственной частоты колебаний будет предельный случай апериодического процесса [26]. Амплитуда колебаний в выбранной неконсервативной системе равна

$$A=\sqrt{x_0^2+\frac{(\dot{x}_0+n x_0^2)}{\omega^2-n^2}},$$

где x_0, $\dot{x}_0$ – начальные условия соответственно по перемещению и скорости, $\omega = c / m$ – собственная частота колебаний приведенной динамической системы, $n = 0.5h / m$ – коэффициент затухания.

Из этой формулы видно, что при соответствующем воздействии на собственную частоту колебаний, демпфирующие свойства системы и начальные условия можно уменьшить динамическую составляющую перемещения захвата с объектом манипулирования при его установке. Например, можно увеличить жесткость манипулятора за счет применения схемы с параллельной структурой или применить манипулятор с замкнутой кинематической цепью; для увеличения демпфирующих свойств системы известен большой арсенал средств; изменение начальных условий связано с производительностью робота и здесь свобода их выбора ограничена целесообразностью разработки робота.

Были попытки создания робота для монтажа крупногабаритных тяжелых изделий на базе портального крана для малоэтажного строительства (позже появились 3D-принтеры подобной конструкции) и на базе башенного крана для многоэтажного строительства. Мы не знаем дальнейшую судьбу этих проектов и даже опытных образцов. О возможности создания роботов для монтажа относительно легких панелей малоэтажных зданий говорится в работе [27].

Выполненные исследования показывают, что создание робота для монтажа железобетонных панелей многоэтажных зданий необходимо решить множество непростых задач. В связи с этим мы придерживаемся существующему мнению, что не нужно приспосабливать робот к существующей технологии монтажа зданий, а менять технологию под современные возможности роботизации строительства. Здесь необходимо решать задачу в комплексе от исходных материалов и изделий с соответствующей логистикой до окончания монтажного цикла. Одним из элементов такой технологии может быть применяемая технология монолитного строительства с использованием автоматизированной системы работы автобетононасоса с бетонораспределительной стрелой-манипулятором.

Можно вспомнить опыт модернизации погрузчика для укладки бордюрного камня: из-за большой инерционности захвата с камнем не удавалось выдержать точность укладки. Проблема была решена путем непрерывной отливки бордюра уже на месте с установкой требуемых разрывов по трассе.

Принципиально можно автоматизировать и роботизировать все, что угодно. Но целесообразно ли это делать в настоящее время для некоторых строительных технологий, например, создавать монтажные строительные роботы тяжелого класса? Альтернативой этому могут быть роботы с неавтоматическими режимами управления или коллаборативные роботы (коботы), которые удачно применяются в дорожном строительстве при укладке плит разного размера и формы.

Выполненное исследование показало, что в настоящее время создавать тяжелого и сверх тяжелого монтажного строительного робота менее целесообразно, чем развитие или совершенствование новой комплексной строительной технологии. При этом необходимо учитывать современный уровень развития цифровизации, автоматизации и роботизации всей строительной отрасли, включая строительство, производство строительных материалов, изделий и конструкций, а также строительного машиностроения. Вероятно стоит развивать создание роботов и манипуляторов с неавтоматическим управлением и коллаборативных роботов (коботов).

Список литературы

1. Самые передовые информационные системы и технологии в строительстве в 2024 году. [Электронный ресурс] URL: https://academy.tsus.ru/samye-peredovye-informaczionnye-sistemy-i-tehnologii-v-stroitelstve-v-2023-godu (дата обращения: 10.05.2024).

2. Технология строительных процессов. В 2 ч. Ч. 1: Учебник / В.И. Теличенко, О.М. Терентьев, А.А. Лапидус. М: Высш. шк., 2005. 392 с.

3. Технология строительных процессов. В 2 ч. Ч. 2: Учеб. для строит. Вузов / В.И. Теличенко, О.М. Терентьев, А.А. Лапидус. М: Высш. шк., 2005.392 с.

4. Булгаков А.Г., Воробьев В.А. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. Монография. Из-во: СОЛОН-Пресс, 2020. 484 с.

5. What is construction robotics? Its Uses and Applications in Construction Industry. 2022. [Электронный ресурс] URL: https://www.constructionplacements.com/construction-robotics (дата обращения: 10.05.2024).

6. Цифровизация строительства. Обзор [Электронный ресурс] URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровизация_строительства._Обзор_TAdviser_2024 (дата обращения: 10.05.2024).

7. Цифровизация строительства (рынок России) 2024 [Электронный ресурс] URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровизация_строительства_%28рынок_России%29 (дата обращения: 10.05.2024).

8. Citation: Prieto SA, Xu X and García de Soto B (2024) A guide for construction practitioners to integrate robotic systems in their construction applications. [Электронный ресурс] URL: https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2024.1307728/full (дата обращения: 10.05.2024).

6. G. Cazzulani, H. Giberti, F. Resta, F. Ripamonti. The Truck-Mounted Concrete Boom Pump: A Dynamic Numerical Model. Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol III, WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K.

7. Overview on the truck mounted concrete boom pump: a dynamic numerical model for active control logic definition. G. Cazzulani, C. Ghielmetti, H. Giberti, F. Resta, F. Ripamonti. 18th IFAC World Congress (IFAC'11) Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011

8. Study on Automatic Spray of Distribution Boom System of Truck Mounted Concrete Pump. Shu-Wen Zhou, Li-XinGuo and Si-Qi Zhang.The Open Mechanical Engineering Journal, 2008, 2, 84-92.

9. Бахман В.А. Обзор видов и анализ современного состояния рынка промышленных роботов-манипуляторов / В.А. Бахман, А.Н. Королева, Е.Л. Царегородцев // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №2 (128). [Электронный ресурс] URL: https://research-journal.org/archive/2-128-2023-february/10.23670/IRJ.2023.128.26 (дата обращения: 05.07.2024). DOI: 10.23670/IRJ.2023.128.26

10. Аналитический обзор мирового рынка робототехники 2019. [Электронный ресурс] URL: URL:https://www.tadviser.ru/images/b/bf/Sberbank_robotics_review_2019

11. Construction Robots Market Analysis [Электронный ресурс] URL: https://www.imarcgroup.com/construction-robots-market (дата обращения: 10.05.2024).

12. Construction Robots in 2024: A Comprehensive Guide. In Construction Magazine•June 11, 2023 [Электронный ресурс] URL: https://neuroject.com/construction-robots (дата обращения: 10.05.2024).

13. Digital Twins in the Construction Industry: A Perspective of Practitioners and Building Authority. ORIGINAL RESEARCH article. Front. Built Environ., 13 June 2022. Sec. Construction Management Volume 8 - 2022 [Электронный ресурс] URL: 10.3389/fbuil.2022.834671 (дата обращения: 10.05.2024).

14. Плавельский Е.П., Густов Д.Ю., Скель В.И., Агарков А.М. О новой подготовке специалистов-механиков для строительной отрасли. Строительство: наука и образование. 2023;13(3):108-129. 10.22227/2305-5502.2023.3.6

15. Beyond googly eyes: stakeholder perceptions of robots in construction Alexander N. Walzer, Aniko Kahlert, Micha Baumann and others. Construction Robotics (2022) 6:221–237 10.1007/s41693-022-00087-y

16. Sam M, Franz B, Sey-Taylor E, McCarty C (2022) Evaluating the perception of human-robot collaboration among construction project managers. In: Construction research congress, p 550–559. DOI:10.1061/9780784483961.058

17. ГОСТ Р 60.0.0.4— 2023/ИСО 8373:2021 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения

18. Exploring the Impact of Construction Robots on the Industry. [Электронный ресурс] URL: https://theconstructor.org/artificial-intelligence/exploring-the-impact-of-construction-robots-on-the-industry/570016 (дата обращения: 10.05.2024).

19. Строительные роботы: технологии будущего уже сегодня. [Электронный ресурс] URL: https://vektorus.ru/blog/stroitelnyj-robot.html (дата обращения: 10.05.2024).

20. Как роботы меняют строительную отрасль уже сейчас. [Электронный ресурс] URL: https://pacs.ru/blog/tekhnologii/kak-roboty-menyayut-stroitelnuyu-otrasl-uzhe-seychas (дата обращения: 10.05.2024).

21. Robotics and automated systems in construction: Understanding industryspecific challenges for adoption. Juan Manuel Davila Delgado an anerer. Journal of Building Engineering 26 (2019) 100868 DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100868.

22. Хоцеловский С.Е. Внедрение робототехнических систем в строительстве // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта. сборник статей. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2021. С. 226-227.

23. Шагина Е.С. Роботизация как метод повышения безопасности строительного производства. Строительство уникальных зданий и сооружений, 2014, №6 (21). С. 128-147.

24. Robots for the Construction Industry. January 2018, DOI:10.1007/978-981-10-5771-7_2 In book: An Economic Analysis on Automated Construction Safety. P. 23-46.

25. Проектирование технических систем. Учебное пособие. Е.И. Юревич, СПбГТУ. СПб. 2001, 96 с.

26. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний: учебник. 3-е изд., испр. СПб.: Издательство «Лань», 2005. 440 с.

27. Industrial robots application in the construction of buildings and structures. Gennady Verzhbovskiy and Alexey Reshetnikov. MATEC Web of Conferences 129, 05018 (2017) DOI: 10.1051/matecconf/201712905018.

Скель Владимир Израилевич, канд. техн. наук, доцент, skelvi@mgsu.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Кайтуков Батраз Амурханович, канд. техн. наук, доцент, KaitukovBA@mgsu.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

HEAVY ASSEMBLY ROBOTS IN CONSTRUCTION TECHNOLOGIES

V.I. Skel, B.A. Kaitukov

The article considers the state and prospects for the development of automation and robotization in the construction industry. It notes the features of construction production that limit the design and use of robots and robotic systems. It is proposed to continue improving construction technologies for modern robotics capabilities, using the capabilities of industry 4.0.

Key words: robotization, automation, construction, heavy robot, positioning accuracy, vibrations.

Skel Vladimir Izrailevich, candidate of technical sciences, docent, skelvi@mgsu.ru, Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering,

Kaitukov Batraz Amurkhanovich, candidate of technical sciences, docent, KaitukovBA@mgsu.ru , Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering

УДК 654.022
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-388-389

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

М.М. Бычковский, Н.Н. Зайкин, Р.И. Кочубей, Е.В. Фатьянова, О.В. Чуприков

В статье представлены критерии оценки надежности функционирования распределенной высокопроизводительной сети в результате воздействия дестабилизирующих факторов. Приведены три основных группы критериев эффективности и условия из применимости. Сделаны выводы об использовании критериев в случаях проектирования или использования существующих сетевых структур.

Ключевые слова: распределенная сеть, критерий, критерий качества, критерий эффективности.

Распределенная высокопроизводительная сеть (РВПС) является автоматизированной системой, которая создана для реализации ряда заранее определенных операций. При этом результаты, которые будут реально достижимыми, могут отличаться от требуемых. Это зависит от ряда факторов, таких как: условия протекания операций, качества системы, реализующих операции, и способов достижения требуемых результатов. Поэтому при оценке принято различать эффективность реализуемых системой операций и качество систем.

Для определения критериальной части методики оценки надежности функционирования вычислительной сети, необходимо первоначально определить терминологический аппарат, характерный для анализируемой предмет-

ной области, провести анализ основных существующих показателей и критериев эффективности функционирования сложных систем, а затем путем логических рассуждений определить наиболее подходящие из них для решения поставленной задачи.

Критерий – признак, основание, правило принятия решения по оценке чего-либо на соответствие предъявленным требованиям. Одним из более главных критериев является критерий истинности [1]. При этом принято различать формальные (логические) и экспериментальные (эмпирические) критерии истинности.

К логическим критериям истины относятся логические законы: истинно всё, что не заключает в себе каких-либо противоречий, то есть является логически правильным.

К эмпирическим критериям истины относятся законы соответствия имеющихся некоторых знаний полученным экспериментальным данным, такие как: «критерий достоверности результатов», «критерий превосходства объекта», «критерий пригодности объекта», «критерий достаточности испытаний».

Область адекватности – область определения частного или обобщенного показателя качества (эффективности), в которой погрешность данного показателя меньше заданной предельно допустимой погрешности.

Ниже представлено математическое описание критериев качества. В общем случае каждое *i*-е качество некоторой *j*-й системы, $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,m}$ может быть определено с помощью некоторой выходной переменной y_i^j, отображающей определенное существенное свойство системы.

Значение y_i^j характеризует меру этого качества или частный показатель качества.

Показатель y_i^j может принимать значение из множества допустимых значений $< y_i^{\text{доп}} >$.

Обобщенным показателем качества j -й системы будет вектор $Y^j = \langle y_1^j,\ y_2^j, \ldots, y_n^j, \rangle$, компонентами которого будут показатели его отдельных свойств.

Частные показатели качества имеют различную размерность. Поэтому при определении Y^i следует оперировать некоторыми нормированными значениями.

Задача нормирования определяется в следующем виде:

$$y_i^н = \frac{y_i}{y_i^0}, \tag{1}$$

где y_i^0 - нормирующая величина.

Возможны несколько подходов к выбору нормирующей величины:

y_i^0 жестко задается;

$y_i^0 = max\, y_i^j$;

$y_i^0 = max\, y_i^j - min\, y_i^j$.

Требуемое качество системы задается правилами, которым должны удовлетворять показатели существенных свойств, а проверки их выполнения называется оцениванием качества системы.

Таким образом, критерий качества – это показатель существенных свойств системы и правило его оценивания [2].

Пусть вектор идеальной системы:

$$Y^* = \langle y_1^*,\ y_2^*,\ \ldots, y_n^* \rangle \tag{2}$$

Тогда область адекватности показателя качества может быть определена следующим выражением:

$$\delta \subseteq |Y^{\text{доп}}/Y*|/|Y^*|, \tag{3}$$

где δ - радиус области адекватности.

Термин «эффективность» неразрывно связывается как с системой, так и с операцией и с решением. Таким образом данные понятия можно считать эквивалентными.

Таким образом под эффективностью будем понимать комплексное свойство процесса функционирования РВПС, как степень ее приспособленности к достижению поставленной перед ней целью [2].

В общем случае оценка функциональных свойств РВПС проводится в следующих аспектах: результат операции (функционирования); алгоритм, обеспечивающий получение результата.

Показателями оценивания результата функционирования и алгоритма, обеспечивающего его получение, являются ресурсоемкость, результативность и оперативность.

Результативность обуславливает её получаемым целевым эффектом, ради которого функционирует конкретная система.

Ресурсоемкость *R* характеризуется ресурсами всех видов (людскими, техническими, энергетическими, информационными, финансовыми и т.д.), используемыми для получения целевого эффекта.

Оперативность *O* определяется расходом времени, потребного для достижения цели функционирования системы.

Таким образом вектор эффективности системы может быть определен следующей целевой функцией:

$$Y\text{эф}=<Y\text{э},Y_R,Y\text{о}>. \tag{4}$$

Самым важным моментом исследования систем является выбор критерия эффективности. Как правило, процесс выбора критерия является субъективным.

Математическое выражение критерия эффективности называют целевой функцией, так как её экстримизация является отражением цели функционирования системы.

Таким образом необходимо найти множество управляемых и неуправляемых характеристик системы, определить цель решения проблемы и показатели исхода операции, чтобы сформировать критерий эффективности решения.

Существует ряд общих принципов, которыми необходимо руководствоваться для формирования критериев эффективности. В зависимости от внешних воздействий и типа систем, критерии могут быть: детерминированными, вероятностными, неопределенными. В связи с этим выделяют три основных группы критериев эффективности и условия их применимости:

1. В условиях определенности, если критерии эффективности отражают один строго определенный исход детерминированной операции.

2. В условиях риска, если критерии эффективности являются дискретными или непрерывными случайными величинами с заранее известными законами распределения в вероятностной операции.

3. В условиях неопределенности, если критерии эффективности являются случайными величинами, законы распределения которых априорно неизвестны.

В соответствии с концепцией ограниченной рациональности критерии пригодности используются для принятия удовлетворительных решений. Если управленческое решение обеспечивает требуемую эффективность операции, оно считается удовлетворительным.

При использовании скалярного показателя эффективности для принятия решения, удовлетворительными будут те решения, которым соответствует оценка используемого показателя не хуже, чем некоторое «пороговое» значение. При использовании векторного показателя, удовлетворительными следует признать такие решения, которые удовлетворяют всем требованиям по частным показателям одновременно, либо обеспечивают требуемое значение обобщенного показателя эффективности или функции полезности, если она известна.

Например, уровень надежности функционирования РВПС должен быть не ниже допустимого значения. При этом в качестве частных показателей выступает надежность функционирования РВПС, а в качестве обобщенного показателя эффективности - уровень устойчивости функционирования. Кроме того, следует отметить, что критерий пригодности относится к задачам обоснования требований к проектируемым РВПС с учетом требуемого заданного уровня показателей устойчивости и представляет собой следующее неравенство:

$$P_{\text{у}} \geq P_{\text{утр}}, \tag{5}$$

где P_y – рассчитанный обобщенный показатель, характеризующий устойчивость функционирования конкретной РВПС и определяемый на основе среднесетевой вероятности связности по показателям устойчивости; $P_{утр}$ – требуемое значение показателя устойчивости функционирования РВПС, определяемое требованиями надежности.

Следующее правило определяет критерий пригодности с точки зрения качества функционирования системы:

$$K^{\text{приг}} : (\forall_i)\ \left(y_i^j \in \delta \middle| \delta_i \rightarrow y_i^{\text{доп}},\ i = \overline{1,n}\right) \tag{6}$$

В данном случае представлено правило, согласно которому j - я система считается пригодной, если значения всех i - х частных показателей y_i^j этой системы принадлежит области адекватности δ, а радиус этой области соответствует допустимым значениям всех частных показателей.

С точки зрения эффективности функционирования системы коэффициент пригодности определяет правило, по которому операция считается эффективной, если все частные показатели исхода операции принадлежат области адекватности.

$$K^{приг}: (\forall i)(y_i^j \in \delta / \delta_i \rightarrow y^{доп}, i \in < Z, R, O >) \tag{7}$$

Таким образом, к критерию пригодности относится правило, согласно которому следует принимать только такие решения по построению РВПС, которые обеспечивают требуемую эффективность операции, то есть требуемую устойчивость функционирования сети в результате воздействия дестабилизирующих факторов. Если таких решений несколько, то считается, что все они одинаковы по предпочтительности и не имеет значение, какое из них выбрать для реализации. Можно было бы принять первое удовлетворительное решение, и на этом прекратить дальнейший поиск, но более рациональным при построении РВПС было бы также воспользоваться критерием превосходства.

Критерий превосходства относится к задачам выбора лучшего по показателю устойчивости проекта РВПС из рассматриваемых альтернатив и представляет собой неравенство:

$$P_{y_j} \geq P_{y_{j-1}}, \tag{8}$$

где P_{y_j}, $P_{y_{j-1}}$ – показатели устойчивости j-го и j–1-го вариантов проектов РВПС.

Следующее правило определяет критерий превосходства с точки зрения качества функционирования системы:

$$K^{\text{прев}} : (\forall_i)\ \left(y_i^j \in \delta \middle| \delta_i \rightarrow \delta^{\text{опт}},\ i = \overline{1,n}\right) \tag{9}$$

В данном случае представлено правило, согласно которому j - я система считается лучшей, если все значения частных показателей качества y_i^j принадлежат области адекватности, а радиус этой области оптимален по всем показателям.

Формально можно утверждать, что справедливо следующее выражение:

$$K^{\text{прев}} \subset K^{\text{опт}} \subset K^{\text{приг}}. \tag{10}$$

При оценивании качества систем с управлением целесообразно выделить нескольких уровней качества, проранжированных в порядке возрастания сложности рассматриваемых свойств.

Система, обладающая качеством определенного порядка, имеет и все более простые качества, но качеств более высокого порядка не имеет. Первичным качеством любой системы является устойчивость, как способность системы возвращаться в равновесное состояние при выводе из него внешними воздействиями [3]. Для сложных характерны различные формы структурной устойчивости, такие, как надёжность, живучесть. Для простых систем устойчивость объединяет такие свойства, как прочность, стабильность, стойкость. Помехоустойчивость является более сложным качеством, чем устойчивость. Она понимается как способность системы без искажений воспринимать и передавать информационные потоки. К таким свойствам относятся пропускная способность, электромагнитная совместимость, кодирование информации. Способность системы переходить за конечное время в требуемое состояние под влиянием управляющих воздействий является следующим уровнем шкалы качества системы - управляемостью. Управляемость объединяет такие свойства системы как оперативность, точность, инерционность и обеспечивается, прежде всего, прямой и обратной связью. На этом уровне качества для сложной системы управляемость включает способность принятия решений по формированию управляющих воздействий. Следующим уровнем по шкале качеств является способность, определяющая возможность системы по достижению требуемого результата на основе имеющихся ресурсов в заданный период времени. Данное качество характеризуется такими свойствами, как результативность, ресурсоёмкость и оперативность. По сути, это способность получить требуемый результат при идеальном способе использования ресурсов и в отсутствии воздействия внешней среды. Наиболее сложным каче-

ством системы является самоорганизация. Самоорганизующиеся система способна изменять свою структуру, алгоритм функционирования, параметры и другие параметры. Свойствами самоорганизации является самообучаемость, адаптируемость, способность к распознаванию ситуации. В зависимости от целей исследования, наличия информации и условия применения системы исследователь выбирает уровень качества.

Таким образом, критерием превосходства будет являться правило, согласно которому следует принимать такое решение по построению РВПС, которое является более предпочтительным по обобщенному показателю качества в сравнении с другими найденными решениями, а также обеспечивает требуемую устойчивость функционирования в результате воздействия дестабилизирующих факторов.

Наиболее сложной задачей является определение оптимального решения из всего множества решений в заданных условиях функционирования системы. Для этого необходимо определить критерий оптимальности.

Критерием оптимальности является характерный показатель решения задачи, по значению которого оценивается максимальное удовлетворение поставленным разработчиком требованиям. Существенную роль в выборе оптимального решения играет правильный выбор критериев.

В общем случае критерий оптимальности относится к задачам обоснования требований к РВПС или проектирования сети при условии, что в заданных ограничениях Ω показатель устойчивости должен иметь максимальное значение:

$$P_y = \max_{\Omega} P_y \tag{11}$$

Критерий оптимальности для оценки детерминированной операции определяет следующее правило (12), по которому операция считается эффективной, если все частные показатели принадлежат области адекватности, а радиус области адекватности оптимален.

$$K^{опт}: (\exists i)(y_i^j \in \delta/\delta_i \to \delta^{опт}, i \in < Z, R, O >) \tag{12}$$

Критерий оптимальности для оценки вероятностной операции определяет правило (13), по которому операция считается эффективной, если вероятность достижения цели по показателям эффективности равна вероятности достижения цели с оптимальными значениями этих показателей:

$$K^{опт}: P_{дц}(Y_{эф}) = P_{дц}(Y_{эф}^{опт}) \tag{13}$$

Методика оценки эффективности систем в неопределенных операциях составляет один из разделов теории принятия решений.

Таким образом необходимо рассмотреть все вышеперечисленные критерии качества и эффективности в контексте оценки надежности функционирования РВПС в результате воздействия дестабилизирующих факторов. При этом необходимо отметить, что критерий оптимальности целесообразно применять при обоснования требований (в том числе и требований по устойчивости функционирования) к РВПС или ее проектировании, а в случаях анализа устойчивости уже существующих сетевых структур целесообразно использовать критерии пригодности и превосходства.

Список литературы

1. Ланнэ А.А., Улахович Д.А. Многокритериальная оптимизация. ВАС, 1984. 94 с.

2. Ланнэ А.А. Оптимальный синтез линейных электронных схем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Связь, 1978. 336 с.

3. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. М.: Наука, 1986. 296 с.

Кочубей Руслан Иванович, преподаватель, kochubey_ri@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Бычковский Михаил Михайлович, преподаватель, bichkovskiy.mm@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Зайкин Николай Николаевич, преподаватель, zaykin53@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Фатьянова Елена Валентиновна, преподаватель, fatlen77@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Чуприков Олег Валерьевич, преподаватель, chuprikov_ov@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного

CRITERIA FOR EVALUATING THE RELIABILITY OF A DISTRIBUTED HIGH-PERFORMANCE NETWORK

R.I. Kochubey, M.M. Bychkovsky, N.N. Zaikin, E.V. Fatyanova, O.V. Chuprikov

The article presents criteria for evaluating the reliability of a distributed high-performance network as a result of the influence of destabilizing factors. Three main groups of effectiveness criteria and conditions of applicability are given. Conclusions are drawn about the use of criteria in cases of designing or using existing network structures.

Key words: distributed network, criterion, quality criterion, efficiency criterion.

Kochubey Ruslan Ivanovich, lecturer, kochubey_ri@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications,

Bychkovsky Mikhail Mikhailovich, lecturer, bichkovskiy.mm@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications,

Zaikin Nikolay Nikolaevich, lecturer, zaykin53@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications,

Fatyanova Elena Valentinovna, lecturer, fatlen77@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications,

Chuprikov Oleg Valerievich, lecturer, chuprikov_ov@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications

УДК 621.3.079
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-392-393

ВЫБОР СПОСОБА КОСВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНЕ

К.М. Чубаров, Ф.А. Сабадаш, О.В. Пантюхин, А.В. Стариков

Статья посвящена определению наиболее точного способа косвенного определения динамического уровня жидкости в скважине. Рассмотренытри различных способа вычисления динамического уровня жидкости на основе сигналов датчиков тока и напряжения станции управления погружным центробежным насосом. Разработана расчетная модель нефтяной скважины, оснащенной погружным центробежным насосом, асинхронным двигателем, преобразователем частоты и тремя видами вычислителей динамического уровня. Представлены результаты компьютерного моделирования, позволяющие обосновано выбрать вычислитель динамического уровня жидкости в скважине, обладающий наименьшей погрешностью.

Ключевые слова: погружной центробежный насос, нефтяная скважина, вычислитель динамического уровня жидкости, станция управления, вычислитель.

Для поддержания заданного дебита нефтяной скважины в станциях управления погружными насосами устанавливают преобразователи частоты и контроллеры, с помощью которых создают замкнутые системы стабилизации динамического уровня жидкости. При этом возникает необходимость использования специализированного датчика, измеряющего непосредственно или косвенно динамический уровень жидкости в скважине.

В большинстве случаев погружной электродвигатель комплектуют термоманометрической системой, которая позволяет измерять давление жидкости на приеме насоса, непосредственно связаное с величиной динамического уровня жидкости известной зависимостью. Однако, установка такого измерительного комплекса значительно увеличивает стоимость наземного и спускаемого в скважину оборудования.

С другой стороны, современные станции управления погружнымицентробежными насосами имеют в своем составе программируемые контроллеры с большими вычислительными возможностями и датчики токов и напряжений. Поэтому появляется возможность косвенно определятьвеличину динамического уровня жидкости в скважинепутем расчета по различным формулам на основе сигналов датчиков тока и напряжения, установленных на выходе станции управления [1 – 3].

Один из способов расчета заключается в измерении фазного тока $I_{су}$ на входе повышающего трансформатора и вычислении динамического уровня $H_{дин1}$ по формуле [1, 2]

$$H_{дин1} = \frac{\left[\left(\frac{I_{су} - I_{хх.ТМПН}}{k_{ТМПН}}\right)^2 - I_0^2\right] M_{ном}}{\left[I_{1ном}^2 - I_0^2\right]\frac{k_Q \rho g}{\eta_{нас}}} - \frac{\eta_{нас} M_0}{k_Q \rho g} - H_{тр} - \frac{P_{буф}}{\rho g} + H_г, \quad (1)$$

где $I_{хх.ТМПН}$ и $k_{ТМПН}$ – ток холостого хода и коэффициент трансформации повышающего трансформатора; $I_{1ном}$ – номинальный ток статора погружного асинхронного двигателя (ПЭД); I_0 – ток холостого хода ПЭД; $M_{ном}$ и M_0 – номинальный момент и момент трогания двигателя совместно с погружным центробежным насосом; $\eta_{нас}$ – коэффициент полезного действия погружного насоса; $H_{тр}$ – потери напора на преодоление сил трения в насосно-компрессорных трубах при движении потока жидкости; $P_{буф}$ – буферное давление на устье скважины; ρ – плотность нефтяной смеси; g – ускорение свободного падения; $H_г$ – дополнительный напор, вызванный работой выделяющегося из жидкости газа; k_Q – коэффициент пропорциональности, связывающий производительность насоса со скоростью вращения.

Формула (1) основана на зависимости тока, потребляемого ПЭД, от момента на валу центробежного насоса, который в свою очередь определяется динамическим уровнем жидкости.

Другой способ основан на измерении фазных токов I_{cy}, напряжений $U_{ф.cy}$ и частоты f_1 на выходе станции управления и расчетединамического уровня жидкости в скважине $H_{дин2}$ по другой формуле[3, 4]

$$H_{дин} = d_1 f_1 - d_2 - \sqrt{d_3 f_1^2 - d_4 U_{ф.cy}\left(I_{cy} - d_5\right) + d_6\left(I_{cy} - d_5\right)^2 \sqrt{d_7 + d_8 f_1^2}}\ , \qquad (2)$$

где ; $d_1 = \dfrac{\pi \eta_{нас} M_{ПЭД.ном}}{Z_n k_Q \rho g\left(\omega_{0.50} - \omega_{ном}\right)}$; $d_2 = \Delta H$; $d_3 = d_1^2$; $d_4 = \dfrac{3 M_{ПЭД.ном} \eta_{нас}^2 \eta_{ПЭД} \cos\phi}{\left(k_Q \rho g\right)^2 \left(\omega_0^{50} - \omega_{ном}\right)}$; $d_5 = I_{хх.ТМПН}$; $d_6 = d_4 k_{ТМПН}^2$; $d_7 = R_{кл}^2$; $d_8 = 4\pi^2 L_{кл}^2$; $\omega_{0.50}$ – скорость идеального холостого хода двигателя при частоте питающего напряжения 50 Гц; $M_{ПЭД.ном}$ и $\omega_{ном}$ – номинальные момент и скорость вращения ПЭД; Z_n, $\eta_{ПЭД}$ и $\cos\phi$ – число пар полюсов, коэффициент полезного действия и коэффициент мощности двигателя; $\Delta H = H_{тр} + \dfrac{P_{буф}}{\rho g} - H_г$.

Формула (2) получена из зависимости активной мощности, потребляемой ПЭД, от величины динамического уровня.

Еще существует способ расчета динамического уровня жидкости по следующему выражению [5]

$$H_{дин} = \frac{d_{12}\left[\dfrac{d_{22} + d_{32} f_1^2}{d_{52}}\left(I_{cy} - d_5\right)^2 - \left(d_{62} U_{ф.cy} - \dfrac{I_{cy} - d_5}{d_{62}}\sqrt{d_7 + d_8 f_1^2}\right)^2\right]}{d_9\left(d_{22} + d_{32} f_1^2\right) - \left(d_{62} U_{ф.cy} - \dfrac{I_{cy} - d_5}{d_{62}}\sqrt{d_7 + d_8 f_1^2}\right)^2} - d_2\,, \qquad (3)$$

где $d_{12} = \dfrac{\eta_{нас} M_{ПЭД.ном}}{k_Q \rho g}$; $d_{22} = \left(R_1 + R_0\right)^2$; $d_{32} = 4\pi^2 L_1^2$; $d_{52} = \dfrac{1}{k_{ТМПН}^2}$; $d_{62} = \dfrac{1}{k_{ТМПН}}$; $d_7 = R_{кл}^2$; $d_9 = I_{1ном}^2$ – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров ПЭД, погружного насоса, соединительного кабеля и повышающего трансформатора.

Формула (3) , также как (1), получена из зависимости тока, потребляемого погружным ПЭД, от динамического уровня, но при этом учитывает изменение реактивного сопротивления статорной обмотки двигателя и соединительного кабеля от частоты питающего напряжения.

Очевидно, что на точность расчета динамического уровня по формулам (1) – (3) будет оказывать влияние погрешность датчиков тока и напряжения, а также определенные упрощения, которые были сделаны при выводе этих формул. В связи с этим целью проводимого исследования является оценка погрешности расчета динамического уровня жидкости скважине тремя рассматриваемыми способами и выбор наиболее точного.

Решение задачи. Решение поставленной задачи произведем методом компьютерного моделирование нефтяной скважины, оснащенной погружным центробежным насосом с асинхронным двигателем и станцией управления с преобразователем частоты.При этом рассмотрим случай, когда для согласования выходного напряжения станции управления с напряжением ПЭД применен повышающий трансформатор ТМПНГ100/3.Скважина имеет площадь затрубного пространства $S_з = 0{,}0083$ м^2, плотность добываемой нефтяной смеси $\rho = 1{,}041$ кг/м^3, коэффициент продуктивности нефтяного пласта $k_{пр} = 9{,}118 \cdot 10^{-6}$ м^3/сут., статический уровень жидкости в скважине $H_{ст} = 180$ м. Насос, имеющий при работе на воде номинальную производительность $Q_{ном.в} = 125$ м^3/сут., характеризуется коэффициентом $k_Q = 4{,}558 \cdot 10^{-6}$ м^3/рад и $\eta_{нас} = 0{,}493$. Рассматриваемый ПЭД имеет следующие характеристики: $I_{1ном} = 27{,}5$ А, $I_0 = 17{,}4$ А, $M_{ном} = 151{,}6$ Нм и $M_0 = 4$ Нм. Для согласования выходного напряжения преобразователя частоты с напряжением ПЭД используется повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации $k_{ТМПН} = 0{,}274$ и током холостого хода $I_{хх.ТМПН} = 5{,}5$ А.

Для достижения поставленной цели разработана расчетная модель совокупности нефтяной скважины, центробежного насоса, ПЭД, преобразователя частоты ПЧ и трех вычислителей динамического уровня жидкости, реализующих формулы (1) – (3) (рис. 1). При этом учтено, что преобразователь частоты формирует линейный закон напряжения $U_{ф.cy}$ в функции частоты f_1 с заданным темпом изменения во времени. Вычислитель динамического уровня жидкости в скважине, реализующий формулу (1), представлен следующей моделью (рис.2).

Вычислитель динамического уровня, основанный на формуле (2), представлен следующим набором блоков(рис. 3). Вычислитель, реализующий формулу (3) представлен расчетной моделью, приведенной на рис. 4. Разработанная расчетная модель позволяет построить в одних осях графики изменения во времени выходных сигналов вычислителей и фактического динамического уровня жидкости в скважине. Моделирование проводилось в 3 этапа. На первом моделировалась ситуация, когда при выводе скважины на стационарный режим работы станция управления формировала на своем выходе номинальное фазное напряжение 220 В частотой 50 Гц. При этом полагалось, что датчики тока и напряжения производят измерения без погрешности.

Результаты моделирования приведены на рис. 5. Кривые 1 – 3 показывают изменения сигналов вычислителей динамического уровня, реализующих соответственно формулы (1) – (3), кривая 4 – фактическое изменение динамического уровня жидкости в скважине. Анализ графиков позволяет сделать, прежде всего вывод, что на начальном этапе работы погружного насоса, когда динамический уровень жидкости начинает изменяться от значения статического уровня погрешности всех вычислителей велики. Это объясняется тем, что ПЭД и центробежный насос начинает работать в режиме, далеком от номинального, что сказывается на фактических значениях коэффициентов полезного действия, входящих в расчетные формулы. Кроме того, особенность программной среды Matlab-Simulink, в которой производилось моделирование, всегда считает начальные условия нулевыми, что сказывается на результатах вычисления.

Однако, при приближении динамического уровня к установившемуся значению 1407 м, соответствующему работе ПЭД на номинальной частоте, вычислитель, реализующий формулу (1), показывает результат 1425 м, то есть погрешность вычисления составляет 1,28%. В то же время выходной сигнал второго вычислителя, работающего по формуле (2), становится равным 1413 м, что соответствует погрешности в 0,42%. Вычислитель же, производящий расчет по формуле (3), показывает установившееся значение динамического уровня равное 1419, что на 0,85% превышает истинное значение. То есть при работе погружного двигателя на напряжении номинальной частоты и амплитуды все 3 вычислителя имеют достаточно малую погрешность без учета действия помех на выходах датчиков тока и напряжения.

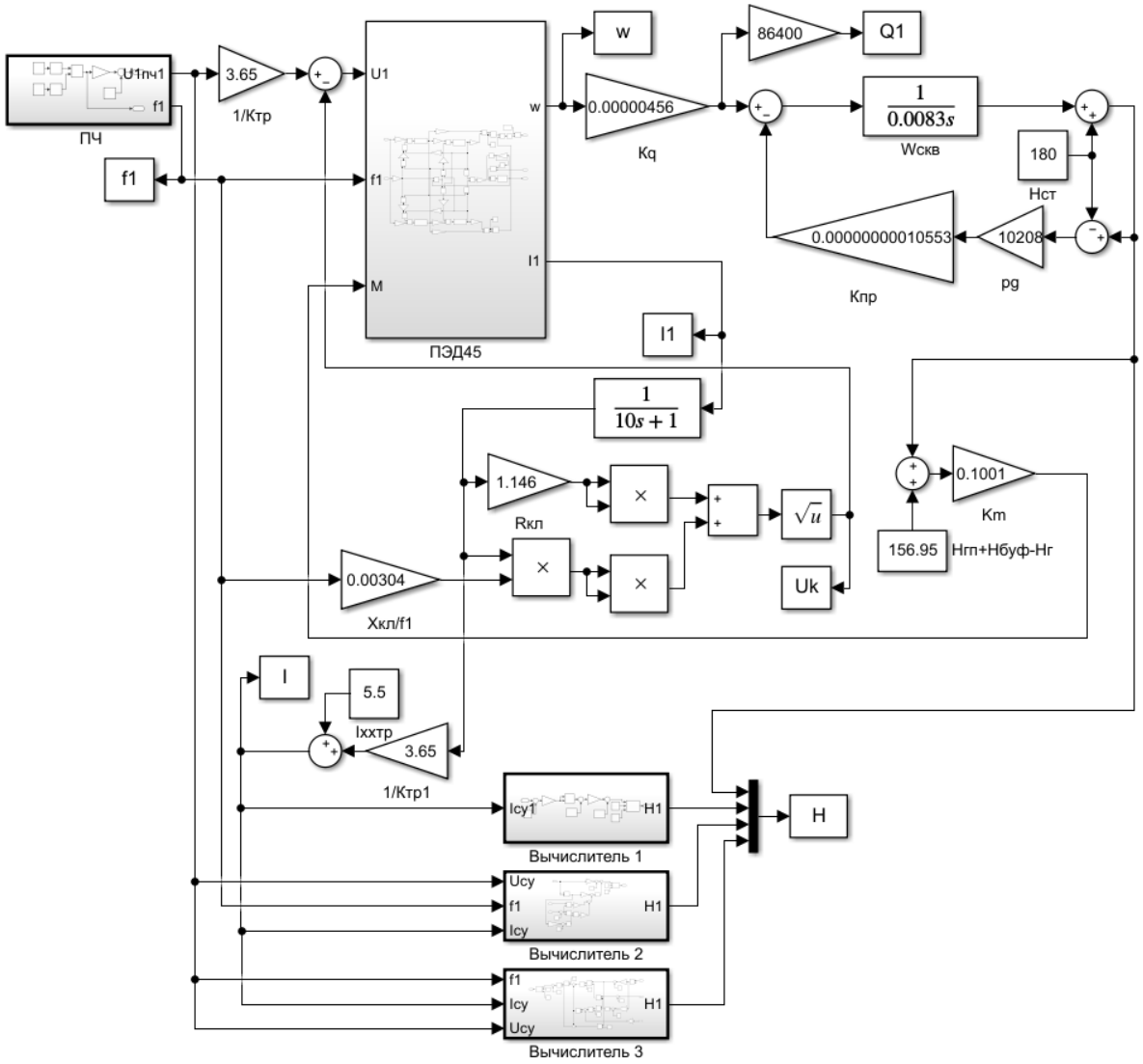


Рис. 1. Расчетная модельразомкнутой системы управления погружным центробежным насосом с вычислителями динамического уровня жидкости в скважине

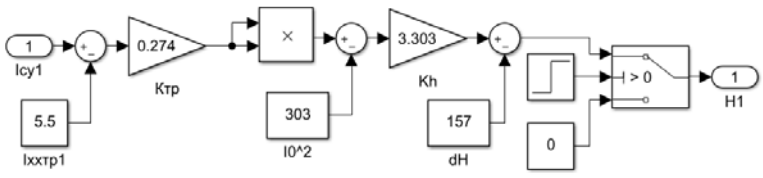


Рис. 2. Расчетная модель вычислителя динамического уровня жидкости в скважине, реализующего формулу (1)

Если же в процессе моделирования задать погрешность в сигналах на выходе датчиков тока и напряжения станции управления погружным насосом, например, в 2%, то получаются следующие результаты (рис. 6).

Они показывают, что при том же фактическом уровне жидкости в скважине первый вычислитель показывает величину 1535 м, второй – 1481 м, а третий – 1522 м. Отсюда можно сделать вывод, что погрешности измерителей тока и напряжения оказывают существенное влияние на точность вычислителей динамического уровня жидкости в скважине. Действительно, погрешность первого вычислителя увеличивается до 9,1%. второго – до 5,3%, а третьего – до 8,2%.

Произведен также вычислительный эксперимент, когда станция управления подает на повышающий трансформатор частоту питающего напряжения ниже номинальной, например, 45 Гц, что соответствует фактическому установившемуся динамическому уровню жидкости в скважине 1289 м (рис. 7).

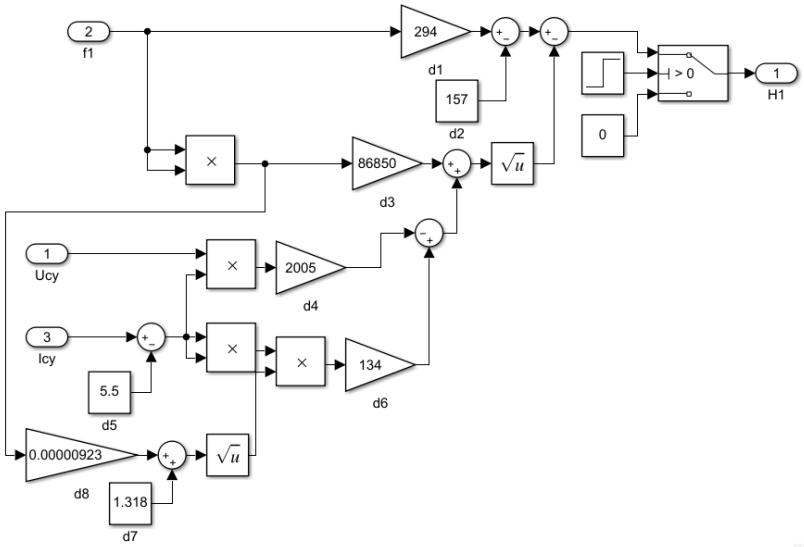


Рис. 3. Расчетная модель вычислителя динамического уровня жидкости в скважине, реализующего формулу (2)

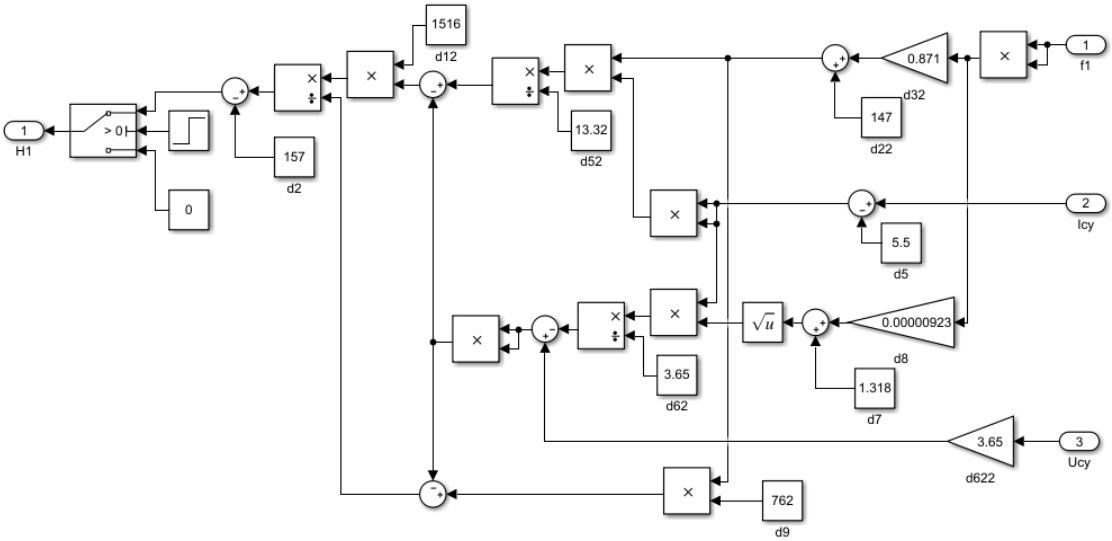


Рис. 4. Расчетная модель вычислителя динамического уровня жидкости в скважине, реализующего формулу (3)

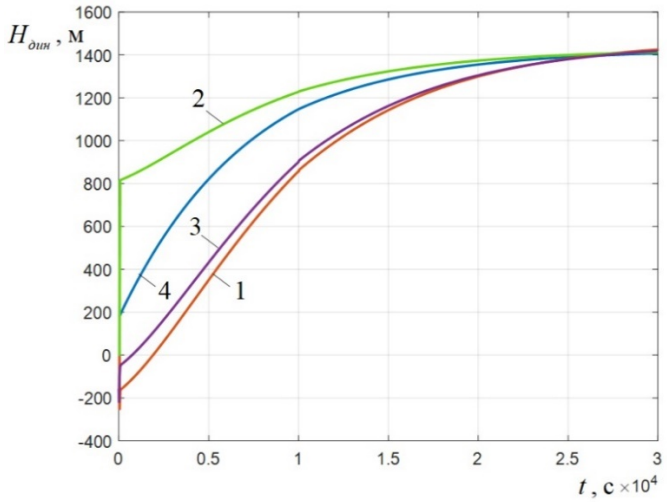


Рис. 5. Графики изменения динамического уровня жидкости в скважине и выходных сигналов вычислителей при работе ПЭД на частоте 50 Гц без учета погрешностей измерителей тока и напряжения

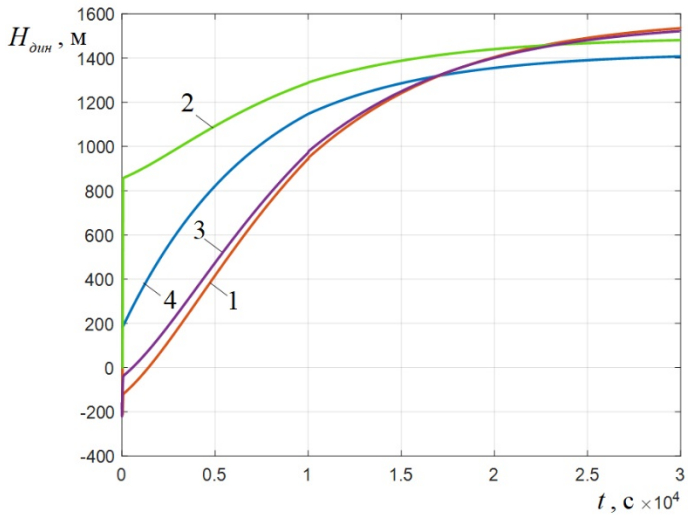


Рис. 6. Графики изменения динамического уровня жидкости в скважине и выходных сигналов вычислителей при работе ПЭД на частоте 50 Гц с учетом погрешностей измерителей тока и напряжения

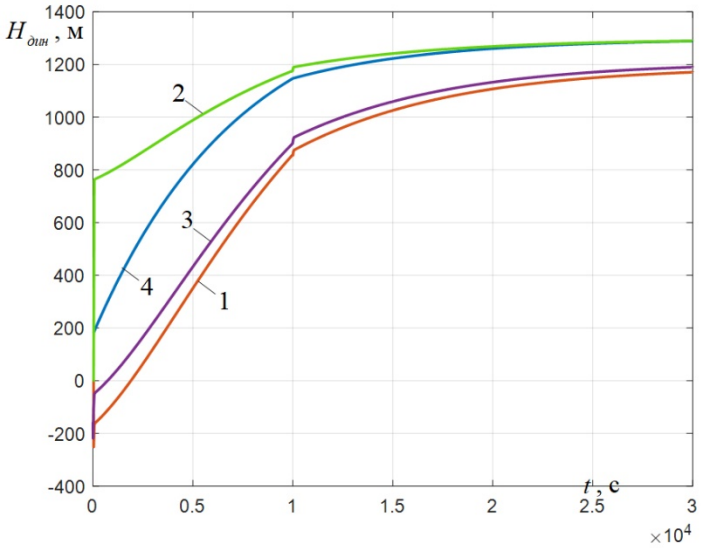


Рис. 7. Графики изменения динамического уровня жидкости в скважине и выходных сигналов вычислителей при работе ПЭД на частоте 45 Гц без учета погрешностей измерителей тока и напряжения

Графики, приведенные на рис. 6, показывают, что первый вычислитель, реализующий формулу (1), показывает установившееся значение динамического уровня равное 1179 м, что соответствует погрешности 10,2%. Вычислитель, определяющий динамический уровень по формуле (2), выдает результат 1289 м, с погрешностью в сотые доли процента. Третий вычислитель, учитывающий изменение реактивного сопротивления от частоты, показывает величину установившегося значения динамического уровня 1190 м, то есть его погрешность составляет 7,7%.

Следовательно, результаты проведенного исследованияпоказывают, что для косвенного измерения динамического уровня жидкости в нефтяной скважине более предпочтительным является вычислитель, осуществляющий расчет динамического по формуле (2) на основании измеренных значений тока и напряжения на выходе станции управления погружным насосом.

Выводы

1. Применение в станциях управления погружными центробежными насосами вычислителя динамического уровня жидкости в нефтяной скважине вполне оправдано, поскольку позволяет обеспечить приемлемую точность косвенного измерения на основании сигналов датчиков тока и напряжения.
2. Предпочтение следует отдать способу вычисления по формуле (2), основанной на зависимости активной мощности, потребляемой погружным электродвигателем, от величины динамического уровня жидкости в скважине.

Список литературы

1.Стариков А.В., Косорлуков И.А., Чубаров К.М. Наблюдатель динамического уровня жидкости в нефтяной скважине // Вопросы электротехнологии, № 3 (40), 2023. С. 72 – 77.

2.Стариков А.В., Косорлуков И.А., Чубаров К.М. Синтез системы стабилизации динамического уровня жидкости в нефтяной скважине по сигналам датчиков тока / Ашировские чтения: Сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции. Том 2. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2023. С. 136 – 144.

3.Чубаров К.М., Косорлуков И.А., Стариков А.В., Козловский В.Н. Система управления погружным электроцентробежным насосом с вычислителем динамического уровня жидкости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Выпуск 2. С. 338 – 345.

4.Патент России № 2825919. Система управления погружным электроцентробежным насосом / А.В. Стариков, В.Н. Козловский, И.А. Косорлуков, К.М. Чубаров (Россия) // Опубл. 02.09.2024, Бюл. № 25.

5.Чубаров К.М., Шуев В.С. Стариков А.В. Разработка вычислителя динамического уровня жидкости в скважине по сигналам датчиков электрических величин станции управления погружным насосом // Вопросы электротехнологии, № 2 (43), 2024. С. 76 – 82.

Чубаров Кирилл Михайлович, аспирант, cool.chubarov@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Сабадаш Филипп Алексеевич, начальник сектора организации работ с поставщиками по замене, ремонту и приемке МТР с объектов, pa_sabadash@ung.rosneft.ru, Россия, Нефтеюганск, Общества Отдела контроля качества МТР ООО «РН-Юганскнефтегаз»,

Пантюхин Олег Викторович, д-р техн. наук, доцент, директор Издательства, olegpantyukhin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Стариков Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, star58@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный техническийуниверситет

SELECTING A METHOD FOR INDIRECTLY DETERMINING THE DYNAMIC LIQUID LEVEL IN A WELL

K.M. Chubarov, Ph.A Sabadash, O.V. Pantyukhin, I.A., A.V. Starikov

The article is devoted to determining the most accurate method for indirectly determining the dynamic liquid level in a well. Three different methods for calculating the dynamic liquid level based on signals from current and voltage sensors of the submersible centrifugal pump control station are considered. A calculation model of an oil well equipped with a submersible centrifugal pump, an asynchronous motor, a frequency converter and three types of dynamic level calculators is developed. The results of computer modeling are presented, allowing one to reasonably select a dynamic liquid level calculator in a well with the lowest error.

Key words: submersible centrifugal pump, oil well, dynamic liquid level, control station.

Chubarov Kirill Mikhailovich, postgraduate, cool.chubarov@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Sabadash Philip Alekseevich, head of the department for organizing work with suppliers on replacement, repair, and acceptance of material and technical equipment from the facilities of the company, pa_sabadash@ung.rosneft.ru, Russia, Nefteyugansk, RN-Yuganskneftegaz LLC,

Pantyukhin Oleg Viktorovich, doctor of technical sciences, docent, Director of the Publishing House, olegpantyukhin@mail.ru, Russia,Tula, Tula State University,

Starikov Alexander Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of department, star58@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 004.85
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-397-398

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОГНИТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В.Р. Гапонов, Е.В. Ляпунцова

В статье исследуется использование когнитивных моделей — когнитивной нагрузки, двойного кодирования и зоны ближайшего развития — для повышения эффективности образовательных технологий. Рассматриваются особенности применения этих моделей для адаптации образовательного процесса под потребности современных поколений: поколения Z и поколения Альфа. Представлены подходы к персонализации обучения, управлению когнитивной нагрузкой. Показано, как данные модели способствуют улучшению восприятия, запоминания, взаимодействия в образовательной среде и повышают качество образовательных технологий.

Ключевые слова: когнитивная модель, студент, образовательные технологии, поколение Z, поколение Альфа

Введение. Современные образовательные технологии играют ключевую роль в обучении, однако их эффективность во многом зависит от соответствия когнитивным механизмам, определяющим восприятие и обработку информации. Поколения Z и Альфа предъявляют новые требования к образовательным подходам, это связано с распространенной проблемой клипового мышления, цифровой грамотностью и потребностью в персонализации. Когни-

тивные модели — когнитивной нагрузки, двойного кодирования и зоны ближайшего развития — предлагают инструменты для повышения качества образовательных технологий. Эти модели позволяют адаптировать материал, улучшить усвоение информации и выстроить взаимодействие между учащимися и преподавателями. Настоящая статья посвящена рассмотрению применения когнитивных моделей в образовательных технологиях с учётом особенностей новых поколений.

Когнитивные модели. Когнитивная модель – абстрактное представление психологического процесса, в котором представлены некоторые моменты, влияющие на деятельность человека. Таким образом когнитивная модель показывает, что заставляет человека реагировать тем или иным образом, в зависимости от ситуации.

Когнитивные модели напрямую связаны с когнитивными процессами. Среди основных когнитивных процессов можно выделить: внимание, восприятие, память и мышление.

Внимание позволяет нам фокусироваться на определённом объекте. Например, на тексте параграфа учебника при подготовке к экзамену. Благодаря восприятию мы понимаем окружающий нас мир через органы чувств. Память позволяет нам помнить какие-то факты, имена людей и др. Память может быть долговременной и кратковременной. В долговременную память информация может попадать, как с помощью речи, так и с помощью знаний, полученных через жизненный опыт. Например, навык катания на велосипеде. Мышление позволяет нам объединить все то, что мы получаем через другие когнитивные процессы и выстроить взаимосвязь. Например, когда человек видит зеленый сигнал светофора, то он узнает о нем через восприятие, благодаря процессу внимания, он фокусируется на светофоре, а из памяти достается информация, что на зеленый свет можно переходить дорогу.

В данной работе будут исследованы 3 когнитивные модели: модель когнитивной нагрузки, модель двойного кодирования и модель зоны ближайшего развития.

Модель когнитивной нагрузки. Авторы модели когнитивной нагрузки считают, что на понимание материала влияет отношение между условиями и характеристикой учащегося [1]. Таким образом если у студента будет, например, недостаточно знаний для понимания нового материала, а подача его будет сложной, внутреннее устройство темы слишком глубоким и запутанным, то студент вряд ли сможет что-то запомнить.

Когнитивная нагрузка, в рамках данной модели, подразделяется на два типа. Первый тип – внутренняя когнитивная нагрузка, второй – внешняя когнитивная нагрузка. Внутренней когнитивной нагрузкой можно назвать материал, связанный с количество изучаемого материала [2].

В качестве примера можно привести способность первоклассника писать слова. Сначала ученик изучает все буквы алфавита, учиться их писать заглавными и строчными, запоминает способы соединения прописных букв. С каждой новой буквой нагрузка увеличивается. Первая идет буква «А», других ученик не знает. У нее есть только нижнее соединение. После того, как школьник выучил весь алфавит он начинает писать слова. Нагрузка становится еще больше, так как теперь нужно комбинировать все способы соединения букв, нужно вспоминать правильно написание и др.

В рамках этого примера можно описать и внешнюю когнитивную нагрузку. Она связана с тем, как предоставлять информацию. Внешняя когнитивная нагрузка может быть как высокой, так и низкий. Все это зависит от сложности и способа подачи материала. Например, если первоклассников учить писать все буквы русского алфавита по порядку, то ему будет тяжело их запомнить. Это связано с тем, что помимо алфавита ученик также учится писать. Именно поэтому в прописях сначала проходят легкие для написания буквы.

Стоит отметить, что существует также релевантная когнитивная нагрузка. Релевантная когнитивная нагрузка – это та часть когнитивной нагрузки, которая непосредственно способствует усвоению и пониманию учебного материала. Она создаётся за счёт интеллектуальных усилий, направленных на решение задач и глубокое осмысление информации. В отличие от внешней или внутренней когнитивной нагрузки, релевантная –поддерживает активное мышление, помогает связывать новую информацию с уже имеющимися знаниями и формировать прочные когнитивные структуры.

Модель двойного кодирования. Модель двойного кодирования была представлена Алланом Паивио. Она описывает, что информация, которую обрабатывает человек, может быть представлена в двух системах кодирования: вербальной и невербальной. К вербальной относят речь, а к невербальной – визуальное восприятие. Основной принцип модели — обработка информации с помощью двух разных, но взаимодополняющих типов кодирования.

Обработка и хранение информации в форме слов, предложений, текстов связаны с вербальным каналом. Он задействован при работе с текстовыми материалами, чтении лекций или при восприятии устной речи. В визуальном канале происходит обработка и хранение информации в виде образов. Он активируется при восприятии изображений, графиков, схем и других наглядных материалов. Когда информация представлена одновременно в вербальной и визуальной формах, она легче запоминается, поскольку активируются оба канала и создаются ассоциации между словами и образами. Если один из типов информации забывается, другой может его дополнить.

Несмотря на различия данных двух систем, они работают сообща и помогают человеку понимать окружающий его мир. Соответственно, для лучшего понимания информации необходимо задействовать как вербальную, так и невербальную системы.

Примером использования модели двойного кодирования может служить изучение строения сердца в курсе биологии. В качестве текстового описания выступает материал, представленный в учебнике. В нем описывается каждый отдел сердца, их функции и значения. Таким образом активируется вербальный канал восприятия информации.

Одновременно с текстом студенты видят анатомическую схему сердца с подписями, которая помогает визуально представить его структуру. В таком случае задействуется визуальный канал, что усиливает усвоение совместно с вербальным каналом.

Также обучающимся может быть представлен видеоролик с анимацией, где будет показываться, как кровь течет через отделы сердца в разные фазы сердечного цикла. Это помогает объединять текстовые и визуальные образы, которые были представлены выше. Благодаря этому создается целостное представление.

После изучения теоретической информации обучающиеся выполняют задание — они должны правильно подписать отделы сердца на пустой схеме, соединяя визуальную информацию с вербальной.

Таким образом, можно заметить, что каждый из способов по отдельности дает полный набор знаний о сердце, однако объединив их вместе можно добиться максимального результата, благодаря объединениям визуальных и вербальных каналов.

Модель зоны ближайшего развития. Модель зоны ближайшего развития была разработана Львом Выготским. В основе модели лежит идея о том, что обучение и развитие происходят в контексте взаимодействия между текущими и потенциальными возможностями [3]. Данная модель предполагает, что наилучшие результаты достигаются, когда учащийся работает над задачами, которые находятся чуть выше его текущих возможностей, но доступны при наличии поддержки. Применение этой модели позволяет адаптировать материал так, чтобы студент был стимулирован и заинтересован, не испытывая при этом чрезмерной сложности.

Модель зоны ближайшего развития подразумевает наличие наставников, который будет наблюдать за успехами ученика и оказывать ему помощь, направленную на конкретные сложные моменты.

Адаптация образовательного материала с использованием модели зоны ближайшего развития позволяет повысить мотивацию учащихся, поддержать процесс постепенного развития и индивидуализировать обучение.

При использовании данной когнитивной модели есть ответственный наставник, который следит за успехами подопечного. Слишком большое или малое влияние на его обучение может плохо сказаться на его когнитивных успехах [4]. Наставник наблюдает за результатами, и если видит, что с поставленной задачей ученик справляется успешно, то можно дать ему то, что находится выше его способностей. Также могут возникнуть ситуации, когда подопечный не может сам справиться с заданием, именно в этот момент наставник должен ему помочь, но не решить проблему полностью.

В качестве примера использования зоны ближайшего развития можно привести катание на велосипеде. В роли наставника выступают, как правило, родственники, родители, бабушки, дедушки и т.д. Изначально мы учимся кататься на четырехколесном велосипеде, с которого тяжело упасть, так как он имеет большее количество точек опоры, чем двухколесный. Мы запоминаем как нужно крутить педали и поворачивать руль, в какие моменту нужно тормозить, а в какие – разгоняться. Таким образом, когда катание на четырехколесном велосипеде освоено успешно, родители могут открутить одно колесо, тем самым дав нам задачу труднее, но которую также можно выполнить. В случае проблем нам всегда готовы помочь. Например, подержать нас, чтобы мы не упали или просто подстраховывать во время первых катаний. Таким образом мы постепенно привыкаем к новым условиям и начинаем кататься на двухколесном велосипеде.

Модель зоны ближайшего развития помогает оптимизировать образовательный процесс, предоставляя посильные задачи, которые стимулируют развитие и уверенность в своих силах.

Как когнитивные модели повышают качества образовательных технологий. При исследовании возможностей для повышения качества образовательных технологий стоит учесть особенности современного поколения. В данный момент в университетах и школах обучаются люди поколения Z и Альфа.

Особенностью поколения Z от других поколений является то, что они могут быстро менять свой поток мыслей, переключаться между задачами [5]. Частично это связано с проблемой клипового мышления. Поэтому при подготовке материалов для студентов данного поколения нужно учитывать, что, например, слайды с большим количеством текста им будут неинтересны и мало чем полезны при запоминании.

В то время как поколение Альфа предпочитают использование гаджетов вместо личного общения, стремятся к лидерству и обладают большими интеллектуальными способностями, чем другие поколения [6]. Таким образом для данного поколения нужно предоставить большую самостоятельность, дать возможность использовать современные цифровые технологии.

Использование модели когнитивной нагрузки должно включать в себя подборку информации необходимо объема. Чтобы внешняя когнитивная нагрузка не была слишком большой. А для большего понимания информации можно использовать релевантную нагрузку. В ее качестве могут выступать презентации, различные модели в определенном масштабе. Необходимо минимизировать количество ненужной информации и визуального шума, поскольку это позволяет учащемуся сосредоточиться на основном содержании.

При использовании фильмов необходимо обратить внимание на их качество. Если видео будет в плохом качестве, то оно не сможет заинтересовать студентов и не окажет никакого воздействия.

В современном мире развито модульное обучение [7]. Оно также связано с использованием модели когнитивной нагрузки, так как помогает учащимся обрабатывать небольшие порции информации, что облегчает запоминание и усвоение материала.

Также не стоит забывать о персонализации обучения. Благодаря персонализации обучения можно будет распределять учебную нагрузку, учитывая когнитивную нагрузку учащихся.

Использование вербальной и визуальной информации, которая описывается в модели двойного кодирования, улучшает восприятие, запоминание и понимание информации. Визуальные и вербальные элементы, используемые вместе, помогают лучше усваивать и запоминать информацию. Как уже было написано выше, для эффективного использования модели двойного кодирования необходимо использовать оба канала. В качестве вербального выступает речь, а в качестве визуального – дополнительные материалы. Например, презентации, рисунки в учебники и т.д.

Данный подход пересекается с моделью когнитивной нагрузки, так как за счет разделения подачи информации на два канала распределяется когнитивная нагрузка на обучающихся. Также основываясь на предыдущих примерах, становится легче строить ассоциативные связи.

Стоит отметить, что использование двух каналов актуально в настоящее время. Студентов тяжело заинтересовать обычным разговором на темы, им необходимы какие-то графики, рисунки, презентации. Необходимо переключаться между каналами. Использовать речь, а затем дать студентам самим возможность изучить что-то через визуальный канал.

Таким образом можно сделать вывод о том, что модель двойного кодирования тесно переплетается с моделью когнитивной нагрузки и играет высокую роль в обучении современного поколения Z и Альфа.

Использование модели зоны ближайшего развития в образовательных технологиях можно представить в различных плоскостях. Одним из вариантов является адаптивное обучение через персонализированные технологии. Образовательные платформы могут использовать данную когнитивную модель, чтобы подбирать задания и учебные

материалы, соответствующие текущему уровню подготовки учащегося. Например, активно используемая платформа для изучения иностранных языков Duolingo. Она анализирует успехи пользователя и предлагает задачи чуть выше его текущего уровня, поддерживая баланс между сложностью и доступностью. Данная модель обучения позволяет удерживать внимание и мотивировать на дальнейшее обучение.

Так как поколение Z и Альф высоко ценит коллективное взаимодействие, то в рамках модели зоны ближайшего развития можно вовлекать их в совместные проекты.

Для поколений с клиповым мышлением важно разбить материал на небольшие, легко усваиваемые сегменты. Данная когнитивная модель предполагает, что каждый следующий модуль будет сложнее предыдущего, но посильным для выполнения.

Также поколения описанные поколения привыкли к немедленным результатам. Образовательные технологии могут предлагать быструю и персонализированную обратную связь. Например, после выполнения задания система сразу оценивает результат, предлагает разбор ошибок и объясняет, какие знания нужно усвоить для перехода к следующему этапу.

Заключение. Использование когнитивных моделей в образовательных технологиях позволяет создавать учебные системы, которые соответствуют когнитивным особенностям учащихся. Модель когнитивной нагрузки помогает оптимизировать подачу материала, снижая избыточную нагрузку и акцентируя внимание на релевантной информации. Модель двойного кодирования способствует лучшему восприятию и запоминанию за счёт использования мультимодальных подходов. Модель зоны ближайшего развития обеспечивает адаптацию обучения, предлагая задачи, находящиеся на границе текущих возможностей учащегося. Интеграция этих моделей в образовательные технологии особенно важна для поколений Z и Альфа, обладающих клиповым мышлением и высокой потребностью в интерактивных, персонализированных методах обучения. Таким образом, когнитивные модели становятся ключевым инструментом повышения качества образования и адаптации его под вызовы цифровой эпохи.

Список литературы

1. Paas F., Tuovinen J.E., Tabbers H., et al Paas F., Tuovinen J.E., Tabbers H., et al. Cognitive Load Measurement as a Means to Advance Cognitive Load Theory. Educational Psychologist, 2003, vol. 38, pp. 63–71. DOI: 10.1207/S15326985EP3801_8 // Educational Psycholog. . 38. . С. 63-71.

2. Беречь мозги от «хлама»: решать задачи школьникам мешает не столько их сложность, сколько способ подачи информации [Электронный ресурс]. URL: https://clck.ru/3EkWiY (Дата обращения: 10.11.2024).

3. Л.С. Выготский Умственное развитие детей в процессе обучения: . Москва: ЁЁ Медиа, 2024. 135 с.

4. Шимаева Л.Р., Тагирова Р.А. Теория когнитивного развития Выготского // Достижения науки и образования. . 1. 2023. С. .

5. Самохвалов Н.А. К вопросу о влиянии зумеров на современную систему образования // Актуальные проблемы современности: наука и общество. . 2. 2021. С. 69-72.

6. Данилова Л.Н. Образовательный запрос поколения Альфа // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Акмеология образования. Психология развития. . 1. 2023. С. 58-67.

7. Титова Е.И., Чапрасова А.В. Примеры реализации принципов модульного обучения в структуре курса высшей математики // Успехи современного естествознания. . 12. 2024. С. 162-165.

Гапонов Владислав Родионович, аспирант, gaponovvr@student.bmstu.ru, Россия, Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

Ляпунцова Елена Вячеславовна, д-р техн. наук, профессор, lev86@bmstu.ru*, Россия, Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

USING COGNITIVE MODELS TO IMPROVE THE QUALITY OF EDUCATIONAL TECHNOLOGIES

V.R. Gaponov, E.V. Lyapuntsova

The article examines the use of cognitive models — cognitive load, dual coding, and the zone of proximal development — to improve the effectiveness of educational technologies. The features of using these models to adapt the educational process to the needs of modern generations of zoomers and alphas are considered. Approaches to personalizing learning and managing cognitive load are presented. It is shown how these models contribute to improving perception, memorization, interaction in the educational environment and improve the quality of educational technologies.

Key words: cognitive model, student, educational technologies, zoomer generation, alpha generation

Vladislav Rodionovich Gaponov, postgraduate, gaponovvr@student.bmstu.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University,

Lyapuntsova Elena Vyacheslavovna, doctor of technical sciences, professor, lev86@bmstu.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University

УДК 004.934
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-401-402

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОСОВОЙ АКТИВНОСТИ В СИСТЕМАХ РЕЧЕВОГО АНАЛИЗА

П.А. Рудакова, В.И. Рудаков

В статье проводится всесторонний анализ современных методов обнаружения голосовой активности (VAD), которые являются ключевым компонентом во многих системах обработки речи и аудиосигналов. Рассмотрены четыре основных типа методов: энергетические, спектральные, статистические, и методы на основе машинного обучения. Освещены их преимущества и недостатки, что позволяет оценить их применимость в различных условиях. Особое внимание уделено анализу, как каждый из методов адаптируется к вызовам, связанным с шумовыми помехами и необходимостью обработки данных в реальном времени. Предложены направления будущих исследований, включая использование передовых техник обучения для снижения зависимости от больших объемов данных и повышения эффективности систем VAD в сложных акустических средах.

Ключевые слова: обнаружение голосовой активности, машинное обучение, спектральные методы, шумоподавление.

Обнаружение голосовой активности (Voice Activity Detection, VAD) является критически важным компонентом во многих системах обработки аудио и речевых технологиях. Эффективность VAD напрямую влияет на качество и эффективность речевого распознавания, систем телекоммуникации, а также многих других приложений, где необходимо точно различать фрагменты голоса от фоновых шумов и тишины. Суть алгоритмов VAD заключается в определении присутствия или отсутствия речи в аудиопотоке, что позволяет улучшить последующую обработку сигналов и оптимизировать ресурсы системы.

С развитием технологий и увеличением требований к качеству речевых коммуникаций возникла потребность в более продвинутых методах обнаружения речевой активности, способных эффективно функционировать в условиях высокого уровня шума и различных акустических сценариев. Современные подходы к VAD включают не только традиционные энергетические и спектральные методы, но и алгоритмы, основанные на машинном обучении и нейронных сетях, которые предлагают значительные улучшения в точности и универсальности.

Обнаружение голосовой активности (VAD) – это технология, используемая для определения наличия или отсутствия речи в аудиосигнале. Основная задача VAD заключается в различении речевых и неречевых сегментов в аудиопотоке, что необходимо для улучшения эффективности обработки сигналов и оптимизации использования ресурсов в речевых и мультимедийных приложениях. Эффективный алгоритм VAD уменьшает объем данных, передаваемых к декодеру, и повышает точность систем распознавания речи, уменьшая их нагрузку за счет исключения несущественных фрагментов.

Алгоритмы VAD могут быть классифицированы на основе их подходов к обработке и анализу сигналов.

Энергетические методы, использующие пороговое значение сигнала для определения наличия речи, характеризуются своей простотой и высокой скоростью обработки, и основаны на идее, что речевые сигналы обычно имеют выше уровень энергии по сравнению с тишиной или фоновым шумом. Эти методы работают путём измерения энергии сигнала в заданном временном окне и сравнения её с заранее установленным порогом.

Одним из таких методов является энергия короткого времени (Short-Time Energy) [4]. Если энергия входящего кадра высока, кадр классифицируется как озвученный, а если энергия входящего кадра низка, он классифицируется как неозвученный. Кратковременная энергия фрейма x_m определяется в соответствии с уравнением:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty}[x(m)h(n-m)]^2 \ ,$$

где

$$h(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46\,cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), & \text{при } 0 \le n \le N-1 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

В этом методе используется окно Хэмминга, которое дает большое затухание за пределами полосы частот по сравнению с прямоугольным окном.

Этот метод эффективен в условиях с минимальным фоновым шумом, но его производительность снижается, когда уровень шума приближается к уровню речевого сигнала.

Для улучшения эффективности энергетических методов в различных условиях шума, может быть использован адаптивный порог, который корректируется на основе средней энергии недавних неречевых сегментов сигнала и может быть выражен как:

$$\theta = \alpha \cdot \bar{E}_{noise} \ ,$$

где α – коэффициент, который контролирует чувствительность порога, а $\bar{E}_{noise}$ — средняя оцененная энергия фонового шума. Значение α обычно больше единицы и подбирается экспериментально.

Однако, энергетические методы часто страдают от низкой точности в условиях переменного уровня шума, так как шум может значительно изменять уровень энергии сигнала. Высокий уровень фонового шума может сильно затруднить различение между шумом и речью, особенно если шум имеет переменную динамику. Также на точность этих методов может повлиять непостоянство речевых сигналов: различные голоса и стили речи могут иметь различные уровни амплитуд, что требует более сложных подходов к установлению порогов.

Таким образом, хотя энергетические методы и являются полезным инструментом в наборе алгоритмов VAD, их использование наилучшим образом подходит для контролируемых или предсказуемых условий звуковой среды. В более сложных акустических условиях предпочтительнее использовать более продвинутые методы, способные учитывать разнообразные аспекты сигнала.

Спектральные методы обнаружения голосовой активности (VAD) используют частотные характеристики звукового сигнала для определения наличия речи [5]. Основываясь на анализе спектра аудиосигнала, эти методы позволяют отличить речь от шума с большей точностью, чем простые энергетические методы.

Спектральный анализ включает преобразование аудиосигнала из временной области в частотную с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT). FFT анализирует каждый сегмент (окно) сигнала, чтобы определить доминирующие частоты и их амплитуды:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{\frac{-i2\pi kn}{N}} \ ,$$

где *S(k)* — спектральный компонент на частоте *k*, *s(n)* — значение сигнала во временной точке *n*, N — общее число точек в анализируемом окне.

Существует несколько способов анализа полученного спектра для обнаружения речи:

Анализ энергии по частотным полосам: оценивается энергия в определённых частотных полосах, наиболее значимых для речи (обычно 300-3400 Гц). Если энергия в этих полосах превышает заданный порог, сегмент классифицируется как речь [3].

Вычисление спектральной плотности мощности (PSD): PSD сигнала вычисляется для каждого окна, и на основе него делаются выводы о наличии речи: где |S(k)| — модуль спектрального компонента на частоте k.

Использование спектральных признаков, таких как мел-кепстральные коэффициенты (MFCC): используются для оценки формант, которые являются резонансными частотами человеческого голоса [1].

Использование спектрального анализа позволяет VAD алгоритмам эффективно работать в условиях различного уровня шума и при разной громкости речи. Спектральные методы особенно полезны в мультимедийных и телекоммуникационных приложениях, где необходима высокая точность определения речевых сегментов.

Перейдем к рассмотрению статистических методов обнаружения речи. Статистические методы обнаружения голосовой активности используют статистическое моделирование для определения вероятности присутствия речи в аудиосигнале. Эти методы обычно превосходят по точности простые энергетические и спектральные методы, особенно в условиях с переменным уровнем фонового шума.

Одним из основных подходов является метод скрытых марковских моделей (СММ) [2]. Скрытые марковские модели используются для моделирования временных последовательностей данных, в которых предполагается, что система находится в одном из нескольких скрытых состояний. В контексте VAD эти состояния могут соответствовать "речь" и "тишина".

Модель СММ описывается следующими параметрами:

Набор состояний $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$,

Начальное распределение состояний $\pi_i = P(q_1 = S_i)$, где q_1 — начальное состояние.

Матрица переходов $A = [a_{ij}]$, где $a_{ij} = P(q_{t+1} = S_j \mid q_t = S_i)$

Функции плотности вероятности для наблюдений, зависящих от состояния $b_i(o_t)$, где o_t — наблюдение в момент времени t.

Для каждого временного окна вычисляются вероятности того, что окно содержит речь, на основе:

$$P(Q \mid O, \lambda) = \sum_{i=1}^{N} \pi_i b_i(o_1) \prod_{t=1}^{T-1} \sum_{j=1}^{N} a_{ij} b_j(o_{t+1}) \ ,$$

где $\lambda = (A, B, \pi)$ – параметры модели; Q – последовательность состояний; O – последовательность наблюдений.

Другим из подходов, более точно моделирующих статистические распределения данных, является смешанные гауссовские модели (СГМ) [4]. СГМ представляют собой смесь нескольких гауссовских компонент, каждая из которых характеризуется средним, ковариацией и весом компоненты. В контексте VAD каждая компонента может моделировать распределение акустических характеристик для речевых и неречевых сегментов.

Функция плотности вероятности СГМ задается как:

$$p(x) = \sum_{k=1}^{K} \omega_k \mathcal{N}(x; \mu_k, \sum_k) \ ,$$

где ω_k – веса компонент; μ_k – средние значения; $\sum_k$ – ковариационные матрицы; $\mathcal{N}$ – гауссовская функция плотности.

Методы на основе глубоких нейронных сетей. Методы на основе глубоких нейронных сетей имеют большой потенциал обрести популярность в решении задач обнаружения голосовой активности, благодаря их способности адаптироваться к различным условиям и улучшать точность обнаружения речи в сложных акустических сценариях.

В современных исследованиях и коммерческих разработках систем обнаружения голосовой активности (VAD) широко применяются модели на основе машинного обучения, включая нейронные сети [6]. Однако значительная часть этих разработок, особенно наиболее эффективные и передовые, остаются закрытыми коммерческими продуктами, доступ к детальному описанию которых ограничен. Это усложняет возможность анализа и сравнения различных подходов в академических исследованиях. С другой стороны, открытые решения, такие как Silero VAD, хотя и доступны для использования, не всегда предоставляют полное описание используемых моделей и могут быть менее эффективными с точки зрения скорости обработки по сравнению с такими инструментами, как WebRTC [7]. Важно отметить, что, несмотря на свою доступность, открытые системы могут страдать от сниженной скорости и точности, что существенно ограничивает их применение в требовательных или реальных производственных условиях. Эта ситуация подчеркивает необходимость дальнейших исследований и разработок в области открытых и доступных технологий VAD.

Ниже представлена сравнительная таблица, которая систематизирует различные методы обнаружения голосовой активности (VAD), выделяя их ключевые преимущества и недостатки, а также примеры известных реализаций.

Тип метода	Преимущества	Недостатки	Типичные области применения
Энергетические методы	Простота реализации, низкие требования к вычислительным ресурсам.	Низкая точность в шумных условиях.	Простые голосовые интерфейсы.
Спектральные методы	Высокая точность в идеальных условиях, учитывает частотные характеристики сигнала.	Сложнее в реализации, требуют больше вычислительных ресурсов.	Аудио и видеоконференции, сложные голосовые интерфейсы.
Статистические методы	Высокая точность, адаптивность к условиям	Требуют большой объем данных для обучения	Безопасность, системы видеонаблюдения

Методы на основе глубоких нейронных сетей	Очень высокая точность, адаптивность, способность обучаться на сложных данных	Требуют значительных вычислительных ресурсов и больших наборов данных для обучения	Голосовые ассистенты, смарт-устройства, мультимедийные приложения

Подводя итог, можно сказать, что разнообразие методов обнаружения голосовой активности (VAD) предоставляет исследователям и разработчикам множество опций для реализации в зависимости от специфических требований приложения. От простых энергетических методов до сложных моделей на основе машинного обучения, каждый подход имеет свои преимущества и недостатки, которые следует тщательно взвешивать при выборе подходящей технологии VAD. Энергетические методы подходят для задач с ограниченными вычислительными ресурсами и требованиями к точности, в то время как спектральные и статистические методы предлагают более высокую точность и адаптивность. С другой стороны, методы на основе машинного обучения, хотя и требуют значительных ресурсов для обучения и выполнения, предоставляют наивысшую точность и гибкость, делая их идеальными для сложных и динамичных приложений.

При выборе метода VAD важно учитывать такие факторы, как условия эксплуатации, доступные ресурсы и конкретные требования к точности и скорости обработки. Оптимальный выбор обеспечит не только высокую эффективность обработки речи, но и удовлетворение специфических потребностей пользователя и системы. В итоге, продолжающиеся исследования и разработки в этой области обещают дальнейшее улучшение технологий VAD, что сделает возможным новые применения и улучшение пользовательского опыта в голосовых и мультимедийных системах.

В заключение статьи следует подчеркнуть, что хотя существующие методы обнаружения голосовой активности (VAD) предоставляют широкий спектр технологических решений, каждый из них имеет свои ограничения, которые могут влиять на их применимость в различных условиях. Например, хотя энергетические методы могут быть быстрыми и экономичными с точки зрения ресурсов, они часто не обеспечивают достаточную точность в шумных условиях. С другой стороны, методы на основе машинного обучения, предлагающие высокую точность и адаптивность, требуют значительных вычислительных ресурсов и больших объемов данных для обучения, что может быть неприемлемо в ограниченных условиях.

Таким образом, важной задачей для будущих исследований в области VAD является разработка таких методов, которые смогут сочетать высокую точность обнаружения речи с экономичностью использования ресурсов. Один из потенциальных подходов к решению этой задачи может заключаться в разработке гибридных систем, которые будут интегрировать быстрые, но менее точные методы с более сложными алгоритмами машинного обучения для улучшения общей точности без значительного увеличения вычислительных затрат. Также перспективным направлением является использование технологий передового обучения, таких как передача обучения (transfer learning) и обучение с частичным привлечением учителя (semi-supervised learning), которые могут помочь уменьшить необходимость в больших объемах тренировочных данных, сохраняя при этом высокую эффективность обработки.

Эти и другие инновационные подходы потенциально могут привести к созданию новых моделей VAD, которые будут более универсальными и эффективными, что, в свою очередь, расширит области их применения в различных секторах, от мобильных устройств и помощников до систем безопасности и автоматизированных промышленных решений.

Список литературы

1. Аксёнов О.Д. Метод мел-частотных кепстральных коэффициентов в задаче распознавания речи // Электронные системы и технологии: 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22-26 апреля 2019 г.: сборник тезисов докладов / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Минск, 2019. С. 45 – 46.

2. Огнев И.В., Парамонов П.А. Распознавание речи методами скрытых марковских моделей в ассоциативной осцилляторной среде // Технические науки. Информатика, вычислительная техника. 2013. № 3 (27).

3. Сергиенко А. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. Питер, 2006.

4. Meduri S.S., Ananth R.A Survey and Evaluation of Voice Activity Detection Algorithms. Кёльн: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.

5. Панова А.А., Яковенко А.А., Методы детектирования голосовой активности // SAEC. 2019. №1.

6. Савенков И.Н., Ермоленко Т.В., Цыбик А.В. Разработка VAD-алгоритма на основе глубокого обучения // Проблемы искусственного интеллекта. 2022. №1 (24).

7. Python interface to the WebRTC Voice Activity Detector [Электронный ресурс] URL: https://github.com/wiseman/py-webrtcvad (дата обращения: 17.04.2024).

Рудакова Полина Андреевна, аспирант, swinol.polina1998@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Рудаков Владимир Иванович, инженер-программист, vladimirrudd@gmail.com, Россия, Тула, ООО «Айтулабс»

COMPARATIVE ANALYSIS OF VOICE ACTIVITY DETECTION ALGORITHMS IN SPEECH ANALYSIS SYSTEMS

P.A. Rudakova, V.I. Rudakov

The paper conducts a comprehensive analysis of modern methods of voice activity detection (VAD), which are a key component in many speech and audio signal processing systems. Four main types of methods are considered: energy-based, spectral, statistical, and machine learning-based methods. Their advantages and disadvantages are highlighted, allowing for an assessment of their applicability under various conditions. Particular attention is given to the analysis of how

each method adapts to challenges associated with noise interference and the need for real-time data processing. Directions for future research are proposed, including the use of advanced learning techniques to reduce reliance on large data volumes and enhance the efficiency of VAD systems in complex acoustic environments.

Key words: voice activity detection, machine learning, spectral methods, noise suppression.

Rudakova Polina Andreevna, postgraduate, swinol.polina1998@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Rudakov Vladimir Ivanovich, software engineer, vladimirrudd@gmail.com, Russia, Tula, OOO «ITooLabs»

УДК 004.021
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-404-405

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПК

Л.Б. Филиппова, Ю.А. Леонов, А.С. Сазонова, Е.С. Музалевский

В статье представлена математическая модель и описан процесс реализации системы конфигурирования персонального компьютера на основе предпочтений пользователя. Модель позволяет подбирать оптимальный набор комплектующих с учетом их производительности, стоимости и совместимости. Разработан интерфейс для взаимодействия пользователя с системой. Предложены метрики оценки эффективности на основе отзывов пользователей.

Ключевые слова: конфигурация, математическая модель, комплектующие, аппаратное обеспечение, персональный компьютер.

Конфигурирование персонального компьютера представляет собой сложную задачу ввиду большого разнообразия комплектующих и их параметров. Ручной подбор оптимальной конфигурации требует экспертных знаний и значительных временных затрат. Вместе с тем автоматизация данного процесса может значительно упростить выбор оптимальной конфигурации ПК. Данную проблему следует решать, разработав математическую модель для автоматического конфигурирования персонального компьютера, которая должна работать на основе предпочтений пользователя по цене, производительности и другим параметрам. Так же необходимо разработать пользовательский интерфейс и сформировать систему оценки эффективности работы модели. Реализация такой системы позволит упростить процесс конфигурации ПК для конечного пользователя.

Методы и материалы исследования

Для того чтобы представить задачу поиска оптимальной конфигурации в виде математической модели, следует использовать систему линейных уравнений, ограниченную системой булевых уравнений, определяющих совместимость комплектующих. Данные уравнения необходимо формировать на основе нормализованных метрик эффективности и производительности аппаратного обеспечения, а также весов, отражающих степень значимости указанных метрик в контексте поиска оптимальной конфигурации. Поиск оптимальной конфигурации ПК, следует идентифицировать как задачу оптимизации, где система линейных уравнений, сводиться к одному уравнению, которое можно рассматривать как целевую функцию. В контексте математической модели, значение целевой функции представляет собой коэффициент оптимальности, который является мерой эффективности системы [5].

Данная задача имеет схожие черты с классическими проблемами линейного программирования и теории полезности. В линейном программировании целью является максимизация или минимизация линейной целевой функции и при этом все ограничения должны быть линейны. Теория полезности, с другой стороны, рассматривает оптимизацию с учетом линейных и нелинейных ограничений, основной целью является максимизация коэффициента полезности.

В данной модели, комплектующие являются конечным множеством, это означает, что число аппаратного обеспечения заранее известно. Математическая модель для поиска оптимальной конфигурации, ограничена системой булевых уравнений, что не свойственно задам линейного программирования и теории полезности. При учете данных особенностей модели, следует рассматривать задачи дискретной, а в частности комбинаторной оптимизации, где оптимальное решение ищется среди дискретных значений, которыми комплектующие и являются.

Эффективность системы достигается путем суммирования произведения нормализованных метрик, описывающих производительность комплектующих на их весовые коэффициенты. Таким образом, веса играют важную роль в балансировке вклада каждой метрики в общую производительность системы. В данной модели, максимизация целевой функции приводит к оптимизации всей системы.

При формировании математической модели, следует учесть, что общее число всех возможных конфигураций ПК, полученных при сопоставлении совместимых комплектующих, составляет $\mathbf{3.75} * \boldsymbol{e^{21}}$. Учитывая указанный масштаб, необходимо уменьшать количество вариантов, поскольку анализ всех возможных сборок без использования подобных методов не представляется возможным. В первую очередь необходимо убрать все комплектующие которых нет в продаже или для них отсутствуют тестовые данные.

Метрика производительности ПК рассчитывается по формуле (1):

$$\boldsymbol{part_{metric} = weight\_cpu_{metric} * cpu_{metric} + weight\_gpu_{metric} * gpu_{metric} + + weight\_ssd_{metric} * ssd_{metric} + +weight\_hdd_{metric} * hdd_{metric}} \quad (1)$$

где $\boldsymbol{part_{metric}}$ – целевая функция, $\boldsymbol{weight\_cpu_{metric}}$ – вес метрики производительности процессора, а $\boldsymbol{cpu_{metric}}$ – метрика процессора.

В алгоритме необходимо учитывать наличие нескольких жестких дисков (HDD) или твердотельных накопителей (SSD). Для определения оптимальной конфигурации выбирается наилучшая метрика, поскольку влияние накопителей на общую производительность системы является невысоким. В свою очередь, наличие нескольких видеокарт не учитывается моделью, ввиду слишком малого количества данных о работе двух видеокарт [4].

Основным параметром модели является тип сборки, с тремя основными метриками: игровая, стационарная и рабочая. Значение веса каждой метрики зависит от предпочтений пользователя, в рамках цели конфигурации ПК.

Следует отметить, что в рассматриваемой формуле учитываются метрики производительности исключительно для процессоров, видеокарт, оперативной памяти и накопителей данных. Это обосновано тем, что именно эти компоненты оказывают основное влияние на общую производительность сборки, в отличие от других комплектующих. Такой подход направлен на более точный учет, влияния комплектующих на эффективность ПК в контексте пользовательских задач.

Ценовая метрика рассчитывается по формуле (2):

$$\boldsymbol{price_{metric} = weight\_cpu_{price} * cpu_{price} + weight\_gpu_{price} * gpu_{price} + \ \dots + weight\_ssd_{price} * ssd_{price} + \\ + weight\_hdd_{price} * hdd_{price},} \quad (2)$$

где $\boldsymbol{weight\_cpu_{price}}$ – вес ценовой метрики процессора, $\boldsymbol{cpu_{price}}$ – цена процессора.

Необходимо подметить, что максимальное влияние на общую производительность системы оказывают процессоры и видеокарты, в то время как оперативная память вносит существенно меньший вклад. Остальные компоненты системы могут воздействовать на производительность лишь косвенным образом.

Кроме того, способ расчета стоимости сборки может быть подвержен вариациям в зависимости от требований пользователя. Необходимо использовать систему неравенств, в которой учитывается минимальная, максимальная и средняя цена сборки (3). Использование такой системы позволит более точно учитывать финансовые предпочтения пользователя и адаптировать конфигурацию с учетом указанных критериев стоимости.

$$\begin{cases} \mathbf{min\_user_{price}} \leq \boldsymbol{weight}\mathbf{\_cpu_{price}} * \mathbf{cpu_{price}} + \cdots + \boldsymbol{weight}\mathbf{\_hdd_{price}} * \boldsymbol{hdd_{price}}, \\ \mathbf{max\_user_{price}} \geq \boldsymbol{weight}\mathbf{\_cpu_{price}} * \mathbf{cpu_{price}} + \cdots + \boldsymbol{weight}\mathbf{\_hdd_{price}} * \boldsymbol{hdd_{price}}, \\ \mathbf{average_{price}} \sim \boldsymbol{weight}\mathbf{\_cpu_{price}} * \mathbf{cpu_{price}} + \cdots + \boldsymbol{weight}\mathbf{\_hdd_{price}} * \boldsymbol{hdd_{price}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\mathbf{min\_user_{price}}$ – минимальная цена, $\mathbf{max\_user_{price}}$ – максимальная цена, $\mathbf{average_{price}}$ – средняя цена, $\boldsymbol{weight}\mathbf{\_cpu_{price}}$ – вес ценовой метрики процессора, $\mathbf{cpu_{price}}$ – цена процессора.

Необходимо учесть эффективность конфигурации ПК в играх, особенно в случае, если пользователь нацелен на получение производительности в конкретных приложениях. Для того чтобы учесть данный параметр, необходимо провести оценку объективности тестовых данных в играх. Это обосновано тем, что количество проведенных тестов может варьироваться в зависимости от выбранных настроек. Комбинирование непопулярных или устаревших комплектующих и несовместимых настроек, может привести к минимальному числу тестовых данных. Использование метрики, рассчитанной на основе таких данных, будет некорректным.

Для решения этой проблемы, для каждого экземпляра тестовых данных, следует рассчитывать относительный коэффициент (4). Полученные значения будут отражать степень доверия к тестовым данным. Это позволит более точно интегрировать данные об игровой производительности в математическую модель, учитывая не только результаты, но и степень их достоверности.

$$\boldsymbol{relative\_coef} = \frac{\boldsymbol{samples_{value}} - \mathbf{\min\limits_{samples}}}{\mathbf{\max\limits_{samples}} - \mathbf{\min\limits_{samples}}} * \mathbf{100}, \quad (4)$$

где $\mathbf{\min\limits_{samples}}$ это минимальное количество тестов на всей выборке, $\mathbf{\max\limits_{samples}}$ это максимальное количество тестов, а $\boldsymbol{samples_{value}}$ это конкретное количество тестов, для которых рассчитывается коэффициент.

Метрика игровой производительности рассчитывается по формуле (5):

$$\boldsymbol{game_{metric} = relative\_coef_{game1} * fps_{game1} + \cdots + relative\_coef_{games} * fps_{game35},} \quad (5)$$

где $\boldsymbol{relative\_coef_{game1}}$ – относительный коэффициент для первой игры, $\boldsymbol{fps_{game1}}$ – средняя частота кадров в секунду в первой игре.

В случае, если пользователь не выбрал некоторые игры, необходимо внести соответствующие коррективы в уравнение, исключив лишние элементы из формулы. По итогу все представленные уравнения формируют систему, которую можно агрегировать в единую целевую функцию.

Таким образом, сведение системы линейных уравнений к целевой функции, позволяет представить результат данного уравнения, в виде универсального показателя оптимальности конфигурации ПК, учитывающего различные параметры и предоставляющего комплексную оценку в соответствии с критериями, установленными пользователем.

Целевая функция рассчитывается по формуле (6):

$$\boldsymbol{y = weight\_part_{metric} * part_{metric} + weight_{price_{metric}} * price_{metric} + weight}\mathbf{\_game_{metric}} * \boldsymbol{game_{metric}} \quad (6)$$

где $\boldsymbol{y}$ – целевая функция, $\boldsymbol{weight\_part_{metric}}$ – вес метрики производительности ПК, $\boldsymbol{weight\_price_{metric}}$ – вес ценовой метрики, $\boldsymbol{weight}\mathbf{\_game_{metric}}$ – вес игровой метрики.

При вычислении целевой функции необходимо использовать весовые коэффициенты, это поможет достичь более точных и объективных результатов при конфигурации ПК. Помимо вычисления целевой функции, необходимо учитывать систему булевых уравнений, представляющую собой ограничения, поскольку существуют комплектующие, несовместимые между собой.

Система булевых уравнений, являющаяся ограничениями математической модели (7):

$$\begin{cases} (\boldsymbol{cpu_{socket} = cpu\_cooler_{socket}}) \wedge (\boldsymbol{cpu_{tdp} \geq cpu\_cooler_{tdp}}) = \mathbf{1}, \\ (\boldsymbol{cpu_{memory\_type} = memory_{type}}) = \mathbf{1}, \\ (\boldsymbol{memory_{type} = motherboard_{memory\_type}}) = \mathbf{1}, \\ (\boldsymbol{cpu\_cooler_{length} \leq case_{length}}) = \mathbf{1}, \\ \dots \\ (\boldsymbol{power\_supply_{pci\_e\_count} \geq gpu_{pci\_e\_count}}) = \mathbf{1}, \\ (\boldsymbol{power\_supply_{cpu\_pin\_count} \geq cpu_{pin\_needed\_count}}) = \mathbf{1}. \end{cases} \quad (7)$$

где $\boldsymbol{cpu_{socket}}$ – это сокет процессора, для каждой переменной такого вида, характерно следующее: основание переменной является названием вида комплектующей, а нижний индекс - это название характеристики. Согласно булевой логике, уравнение $(\boldsymbol{cpu_{socket} = cpu\_cooler_{socket}}) \wedge (\boldsymbol{cpu_{tdp} \leq cpu\_cooler_{tdp}})$ означает что название характеристики “Сокет” у процессора и кулера должны быть равны и рассеиваемая мощность кулера должна быть больше или равна тепловыделению (TDP) процессора.

В контексте данной математической модели, процесс выражения предпочтений пользователя по отношению к различным компонентам можно представить в соответствии с теорией полезности, хоть и ограничения системы являются булевыми уравнениями, такая аналогия упростит понимание математической модели и подхода к расчету оптимального коэффициента.

Целевая функция в виде уравнения полезности (8):

$$\text{Полезность} = \boldsymbol{weight_1 * param_1 + weight_2 * param_2 + + weight_n * param_n} \ldots \quad (8)$$

где $\boldsymbol{weight_i}$ – весовой коэффициент, а $\boldsymbol{param_i}$ – значение параметра.

В таблице 1 представлены параметры математической модели, вводимые пользователем:

Таблица 1

Параметры математической модели, вводимые пользователем

Параметр	Возможные значения
Минимальная цена	От минимальной цены комплектующей, до максимальной цены сборки.
Максимальная цена	От 0, до максимальной цены сборки.
Средняя цена	От минимальной цены комплектующей, до максимальной цены сборки.
Только товары, которые в наличии	Да, нет (в виде checkbox).
Товары из DNS	Да, нет (в виде checkbox).
Товары из Citilink	Да, нет (в виде checkbox).
Игровая метрика	Проценты, от 0 до 100.
Стационарная метрика	Проценты, от 0 до 100.
Рабочая метрика	Проценты, от 0 до 100.
Влияние каждой комплектующей на модель	Проценты, от 0 до 100.
35 самых популярных игр	Да, нет (в виде checkbox), появляется если выбрать все игры – нет.
Средний fps в играх	Целочисленное значение, от 0.
Минимальный fps	Целочисленное значение, от 0, не больше максимального и среднего fps.
Максимальный fps	Целочисленное значение, от 0, не меньше минимального fps и среднего fps.
Игровые настройки для всех игр	Низкие, средние, высокие, ультра (максимальные), усредненное значение.
Разрешение экрана для всех игр	720p, 1080p, 1440p, 4k, усредненное значение.
Имеющиеся комплектующие	Любые комплектующие которые должны быть изначально включены в сборку.
Количество SSD накопителей	Целочисленное значение, от 0 до 10.
Количество HDD накопителей	Целочисленное значение, от 0 до 10.
Общий объем SSD накопителей	Гигабайты, от 0 до 10000.
Общий объем HDD накопителей	Гигабайты, от 0 до 10000.
Генерация охлаждения корпуса	Да, нет (в виде checkbox).
Блок питания с запасом мощности	Да, нет (в виде checkbox).
Генерация корпуса	Да, нет (в виде checkbox).
Количество оптимальных сборок	Целочисленное значение, от 0 до 10.

Поскольку в интернете отсутствуют конкретные данные о влиянии отдельных комплектующих на общую производительность сборки, следует предоставить пользователям возможность вводить собственные весовые коэффициенты. Эти весовые коэффициенты служат основой для расчета уравнения цены (1), и уравнения метрик (2). Важно отметить, что метрики имеются исключительно у тех комплектующих, которые оказывают непосредственное воздействие на общую производительность сборки. Для определения влияния на производительность используются метрики с сайта *UserBenchmark*, который выделяет процессор, видеокарту, оперативную память, а также SSD и HDD накопители как компоненты, имеющие наибольшее воздействие на ПК. Другие комплектующие, для которых метрики не предоставлены, рассматриваются только в контексте их стоимости и совместимости с другим аппаратным обеспечением.

Таким образом, пользователь может более точно настроить весовые коэффициенты, управляя влиянием каждой комплектующей на цену и производительность сборки в соответствии с собственными предпочтениями и целями (рисунок 1).



Рис. 1. Интерфейс ввода весовых коэффициентов

Весовые коэффициенты подобраны, основываясь на влиянии комплектующих на производительность ПК. Корпус, блок питания и охлаждение, могут лишь косвенно влиять на производительность, но только при недостаточном качестве комплектующих, непосредственное воздействие на работу ПК, они не оказывают.

Производительность твердотельных накопителей и жестких дисков влияет на скорость передачи файлов и при их низком качестве, данный процесс может стать узким горлышком системы. В таком случае проблемы у системы будут только с передачей данных, на конкретный слабо производительный накопитель, поэтому комплектующие такого вида имеют более низкое влияние чем процессоры, видеокарты, оперативная память и материнская плата.

Пользователь имеет возможность выбирать игры, разрешение экрана и игровые настройки, которые он предпочитает при игре. Выбор параметров графики определяет то, при каких настройках пользователь будет играть в указанные игры. В математической модели, выбранные желаемые значения минимального, среднего и максимального количества кадров в секунду (*FPS*), будут учитываться в соответствии с указанными параметрами графики (рисунок 2).

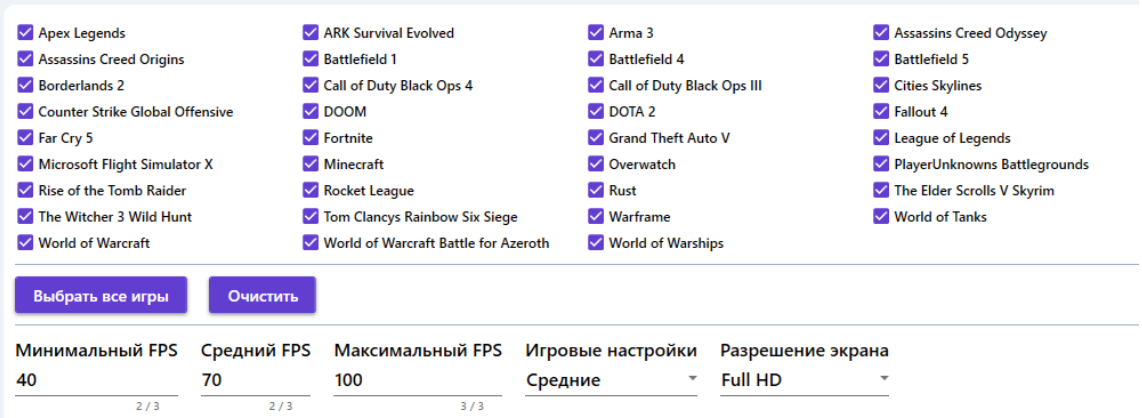


Рис. 2. Интерфейс ввода игровых данных

Математическая модель учитывает не только среднюю цену, но также минимальную и максимальную стоимость комплектующих. При генерации, сборка будет максимально близко подобрана к указанной средней цене, но при условии того, что на позиции процессора, оперативной памяти, видеокарты и накопителей, будут оптимальные комплектующие. Если оптимальная производительность системы достигается за счет большой или меньшей цены, то система не будет подбирать комплектующие лишь для того, чтобы удовлетворить критерию средней цены. При этом генерируемая сборка не может выходить за верхнюю и нижнюю границу стоимости.

Пользователь имеет возможность указать предпочтительные магазины (DNS, Citilink) для поиска комплектующих. В интерфейсе, также можно разрешить использование товаров, которых нет в наличии, при генерации ПК.

Дополнительные настройки включают в себя возможность ввода различных метрик (игровая, стационарная, рабочая), Процентное влияние каждой метрики определяет цель создаваемой конфигурации. Игровая метрика оценивает эффективность ПК в играх, стационарная метрика оценивает способность ПК справляться с офисными задачами, такими как Word, Excel, работа в браузере и одновременное использование нескольких приложений. Под рабочей метрикой понимается эффективность работы ПК со специализированными программами, такими как Visual Studio, Photoshop, AutoCAD и другие (рисунок 3).

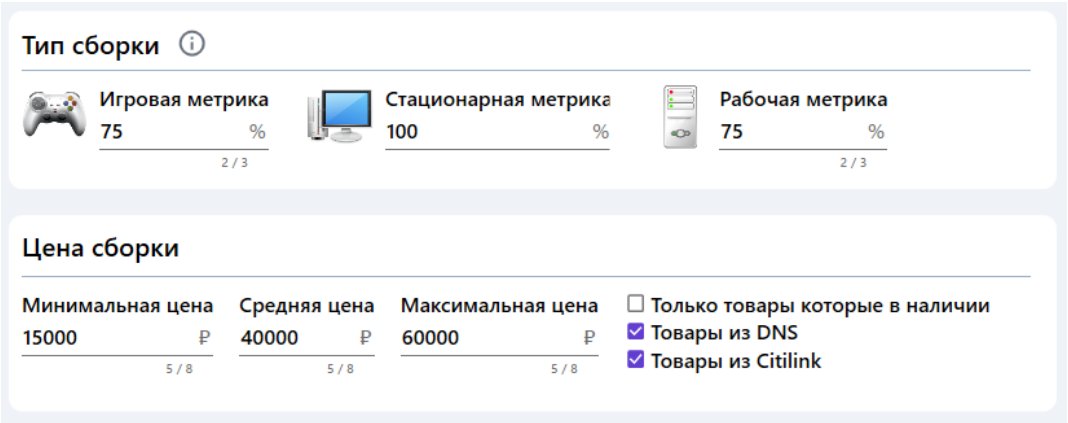


Рис. 3. Интерфейс ввода параметров, отвечающих за тип и цену генерируемой сборки

Пользователь может указать, будет ли сгенерировано охлаждение корпуса, а также будет ли генерироваться блок питания с дополнительным запасом мощности (стандартный запас - 10% от общей мощности).

Также предусмотрена возможность, учесть уже имеющиеся у пользователя комплектующие при создании сборки (рисунок 4).

Оценка эффективности системы представляет собой сложную задачу, поскольку отсутствует набор данных, в котором определена производительность сборок и их соответствие параметрам доступным для ввода пользователями. Метрики комплектующих и их характеристики могут служить как исходные данные, но если рассматривать данную проблему как задачу классификации, то отсутствуют исходные данные в виде оценок, сопоставленных с конкретными конфигурациями.

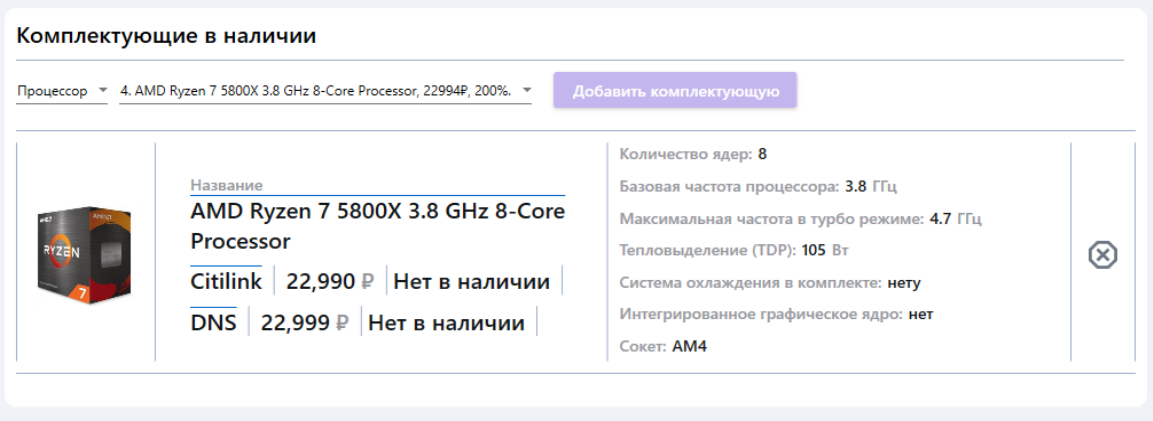


Рис. 4. Интерфейс выбора уже имеющихся комплектующих

Исходя из этого, существует только два основных направления, при создании алгоритмов оценки эффективности данной системы. Во-первых, необходимо учесть опыт пользователей, путем внедрения функционала, позволяющего пользователям выставлять оценки сгенерированным сборкам по десятибалльной шкале и дополнять их комментариями.

Во-вторых, следует применять метрики оценки эффективности математических моделей, например: точность генерации сборок (*Accuracy*), полнота классификации предпочтительных сборок (*Recall*) и другие.

В результате работы такой системы будет сформирован, обширный набор данных, который сможет стать основой для создания системы оценивания всех последующих сгенерированных ПК. Совокупное использование обоих подходов позволит создать систему оценки эффективности, которая сможет развивать себя за счет постоянного увеличения набора данных и последующего их применения при генерации сборок.

Необходимо применять следующие метрики при оценке эффективности системы:

Точность генерации сборки (*Accuracy*). Данная метрика предоставляет общую оценку правильности работы системы. В случае конфигурации ПК, точность важна для общей оценки того, насколько хорошо система справляется с обработкой всех параметров, вводимых пользователем и генерацией сборки (9).

$$\boldsymbol{Accuracy} = \frac{\text{Количество предпочтительных сборок}}{\text{Общее количество сборок}} \times \mathbf{100\%}, \quad (\mathbf{9})$$

где “Количество предпочтительных сборок” (*True Positives*) - это число сборок которые пользователи посчитали оптимальными относительно введенных параметров, а “Общее количество предсказаний” (Total Predictions) – это суммарное количество сборок, выбранных для классификации.

Точность генерации предпочтительных сборок (*Precision*) и полнота классификации предпочтительных сборок (*Recall*).

В контексте конфигурации ПК, метрика точности необходима для определения доли сборок, которые пользователи оценили как предпочтительные, но фактически являются неэффективными (10). В свою очередь, метрика полноты поможет выявить больше предпочтительных сборок среди тех, которые пользователи могли оценить как менее эффективные (11).

$$\boldsymbol{Precision} = \frac{\boldsymbol{True\ Positives}}{\boldsymbol{True\ Positives + False\ Positives}}, \quad (\mathbf{10})$$

$$\boldsymbol{Recall} = \frac{\boldsymbol{True\ Positives}}{\boldsymbol{True\ Positives + False\ Negatives}}, \quad (\mathbf{11})$$

где *True Positives* – это число сборок, верно классифицированных как предпочтительные, а *False Negatives* – это число сборок, неверно классифицированных как неэффективныею

F-мера (*F1 Score*). *F*-мера позволяет найти баланс между метриками точности и полноты, что поможет более верно классифицировать сгенерированные сборки (12). В случае конфигурации ПК, где необходимо достигнуть определенного уровня в классификации предпочтительных сборок, *F*-мера поможет найти оптимальный баланс.

$$\boldsymbol{F1} = \mathbf{2} \times \frac{\boldsymbol{Precision} \times \boldsymbol{Recall}}{\boldsymbol{Precision} + \boldsymbol{Recall}}, \quad (\mathbf{12})$$

где *Precision* - это доля правильно предсказанных предпочтительных сборок относительно всех сборок, предсказанных как предпочтительные, а *Recall* это доля правильно предсказанных положительных сборок относительно всех истинных положительных сборок.

Матрица ошибок (*Confusion Matrix*). В контексте конфигурации ПК, с помощью матрицы ошибок, можно определить, насколько часто система делает неверные предсказания при оценке эффективности сборок.

В матрице ошибок каждый элемент представляет собой количество объектов для конкретной комбинации истинного и предсказанного классов (13).

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{True\ Negative} & \boldsymbol{False\ Positive} \\ \boldsymbol{False\ Negative} & \boldsymbol{True\ Positive} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Среднеквадратическая ошибка (*Mean Squared Error, MSE*). В контексте конфигурации ПК, для более точной оценки эффективности следует использовать *MSE*, данная метрика позволит измерять среднеквадратичное отклонение предсказанных значений эффективности сборки от фактических (14).

$$\boldsymbol{MSE} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{n}} \sum_{\boldsymbol{i}=\mathbf{1}}^{\boldsymbol{n}} (\boldsymbol{y_i} - \boldsymbol{\hat{y}_i})^{\mathbf{2}}, \quad (14)$$

где $\boldsymbol{\hat{y}_i}$ - предсказанное значение эффективности сборки $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{y_i}$ – это фактическое значение эффективности сборки $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{n}$ – это общее количество сборок.

Полноценную оценку эффективности системы и расчет конкретных метрик следует проводить после агрегации достаточного объема данных, содержащих оценки от пользователей. Только в таком случае станет возможным формирование адекватной системы реагирования на пользовательские оценки и реализация алгоритма расчёта весовых коэффициентов. Это особенно важно, учитывая сложность предсказания предпочтений пользователей. Такой подход обеспечит более точную адаптацию системы под ожидания и потребности пользователей.

Для выбора оптимальных комплектующих выбран метод ветвей и границ. Данный метод используется для точного решения комбинаторных задач путем разбиения пространства поиска на подзадачи и эффективного отсева некоторых ветвей, не требующих дальнейшего изучения. В рамках поиска оптимальной конфигурации ПК, в математической модели есть много параметров, которые могут исключать целые комплектующие из поиска, или большую часть комплектующий по какой-либо характеристике. Например, указав что для генерации будут использоваться комплектующие только представленные в конкретном магазине, можно значительно сократить выборку аппаратного обеспечения, и по итогу сделать намного меньше вычислений для поиска оптимальной конфигурации.

Результаты исследований. В результате проведенного исследования разработана математическая модель, учитывающая вводимый пользователем набор параметров, указанный в таблице 1. Данная модель определяет оптимальную конфигурацию персонального компьютера. Для взаимодействия с пользователем разработан интерфейс, с применением технологии WPF (Windows Presentation Foundation). Данный интерфейс обеспечивает возможность ввода параметров 69 параметров и отображения сгенерированных компьютерных сборок.

Для каждой сгенерированной комплектующей, в интерфейсе представлены ее основные характеристики, цены, наличие комплектующей и ссылки на соответствующие сайты продажи.

На рисунке 5 представлены первые две комплектующие из одиннадцати сгенерированных в рамках поиска оптимальной сборки ПК:

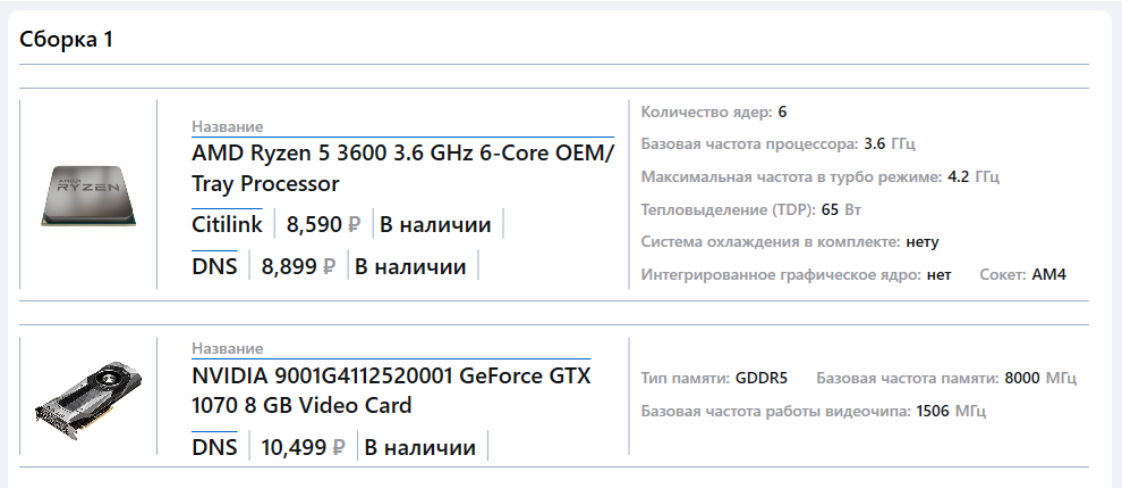


Рис. 5. Первые две комплектующие сгенерированной оптимальной конфигурации ПК

Первые две комплектующие, взяты из конфигурации, сгенерированной на стандартных настройках (рисунки 1-3). Введенные пользователем комплектующие, отображенные на рисунке 4, не учитывались при генерации конфигурации ПК.

Для каждой сборки выводиться статистика, включающая оптимальные цены на комплектующие (алгоритм учитывает доступность товаров в различных магазинах). Кроме того, предоставляется информация о суммарном объеме HDD и SSD накопителей в гигабайтах.

В пользовательском интерфейсе предусмотрено окно для ввода отзывов о качестве сгенерированной сборки, где пользователь может внести текстовое содержание своего отзыва, а также предоставить оценку по 10-балльной шкале.

Заключение. В данной статье представлена математическая модель для поиска оптимальной конфигурации персонального компьютера на основе параметров, вводимых пользователем. Разработан программный интерфейс для взаимодействия пользователя с моделью. Предложены метрики для оценки эффективности работы системы, учитывающие оценки пользователей.

Список литературы

1. Гольчевский Ю. В. Проектирование и разработка сервисного веб-конфигуратора для сборки компьютера / Ю. В. Гольчевский, Н. Ю. Щукин // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1. Математика. Механика. Информатика. 2022. №1 (42). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-i-razrabotka-servisnogo-veb-konfiguratora-dlya-sborki-kompyutera (дата обращения: 12.01.2024).

2. Горлач Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б. А. Горлач, В. Г. Шахов. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 292 с.

3. Запечников С.В. Основы интеллектуального анализа данных и машинного обучения: Конспект лекций : учебное пособие. Москва: НИЯУ МИФИ, 2022. 136 с.

4. Занина Е.С., Зотов Е.В. Формирование выборки SSD-накопителей на основе формулы по расчету их скорости работы для систем автоматизации комплектующих ПК // Символ науки. 2020. №3. [Электронный адрес]

URL: https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-vyborki-ssd-nakopiteley-na-osnove-formuly-po-raschetu-ih-skorosti-raboty-dlya-sistem-avtomatizatsii-komplektuyuschih-pk (дата обращения: 7.01.2024).

5. ISO/IEC 2382:2015 Information technology — Vocabulary // International Organization for Standardization [Электронный адрес] URL: https://www.iso.org/standard/63598.html (дата обращения: 30.06.2023).

6. Кузьменко А.А. Методы и подходы к разработке системы автоматизированного анализа динамики изменения площади лесных насаждений на основе методов автоматического распознавания образов / А. А. Кузьменко, Д. Е. Кондрашин // Эргодизайн. 2019. № 4(6). С. 230-240. DOI 10.30987/2619-1512-2019-2019-4-230-240.

7. Кузьменко А.А. Психолого-педагогические основы реализации компетентностного подхода при формировании профессиональных компетенций будущих эргономистов-дизайнеров / А. А. Кузьменко, В. В. Спасенников // Педагогика и психология: сборник статей по материалам I международной заочной научно-практической конференции. Том № 1 (1): Общество с ограниченной ответственностью "Международный центр науки и образования", 2016. С. 24-34.

8. История создания электронных изданий / А. А. Алисов, С. В. Кондратенко, А. А. Кузьменко [и др.] // Эргодизайн. 2018. № 1. С. 5-9. DOI 10.30987/article_5bbf0a8a47a1d1.47400349.

Леонов Юрий Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, yorleon@yandex.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Филиппова Людмила Борисовна, канд. техн. наук, доцент, libv88@mail.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Сазонова Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, asazonova@list.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет,

Музалевский Евгений Сергеевич, студент, libv88@yandex.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный технический университет

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SEARCHING OPTIMAL PC CONFIGURATION

L.B. Filippova, Yu.A. Leonov, A.S. Sazonova, E.S. Muzalevsky

The article presents a mathematical model and describes the implementation process of a personal computer configuration system based on user preferences. The model enables the selection of an optimal set of components, considering their performance, cost, and compatibility. An interface has been developed for user interaction with the system. Metrics for assessing effectiveness based on user feedback are proposed.

Key words: configuration, mathematical model, components, hardware, personal computer.

Leonov Yuri Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, yorleon@yandex.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Filippova Lyudmila Borisovna, candidate of technical sciences, docent, libv88@mail.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Sazonova Anna Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, asazonova@list.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University,

Muzalevsky Evgeny Sergeevich, student, libv88@yandex.ru, Russia, Bryansk, Bryansk State Technical University

УДК 621.744.07
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-411-412

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАСТЕР-МОДЕЛИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ю.А. Темпель, С.И. Митрохин

Одной из локальных инноваций в заготовительном производстве является применение аддитивных технологий при формировании заготовительной оснастки. Аддитивные технологии позволяют получить разную форму моделей, в связи с этим рассмотрение темы является актуальным вопросом при изготовлении деталей сложной конфигурации. В рамках реализации исследования разработана литейная оснастка для литья в песчано-глинистые формы с применением аддитивных технологий. При помощи станков послойного наращивания материала созданы смоделированные матрицы, способствующие как формированию отпечатка в литейной песчаной форме, так и формированию песчаных стержней, которые в процессе заливки металла образуют полости в отливке. Объект исследования: технологическая операция получения заготовок при применении аддитивных технологий. Предмет исследования: показатели формирования литейных матриц для детали «Корпус плунжерного насоса».

Ключевые слова: литейное производство, мастер-модели, аддитивные технологии, 3-D печать, машиностроение, песчано-глинистые формы.

Аддитивные технологии получили свое развитие в настоящее в время, как в основных процессах производства [1-4], так и в заготовительном производстве.

Применение аддитивных технологий в стандартный процесс литья в песчано-глинистые формы обусловлен возможностью обеспечить хорошую точность для литейных форм при меньшей себестоимости матриц для формирования как мастер-модели, так и песчаных стержней относительно стандартных матриц из дерева. Обычно мастер-модель изготавливается в натуральную величину, но в рассматриваемой работе мастер-модель и все остальные элементы литейной оснастки выполнены в масштабе 1:2,5 по причине экономии материалов, а также по причине ограниченности рабочей зоны 3D принтера, при помощи которого создаются элементы литейной оснастки. У мастер-модели есть много преимуществ, таких как возможность наглядного и осязаемого представления будущего изделия, невысокая стоимость и быстрота изготовления, а также при необходимости есть возможность доработать модель до запуска партии в производство, что может помочь предотвратить большое количество брака в производстве.

В данном исследовании будет рассмотрен процесс литья детали «Корпус плунжерного насоса» в песчано-глинистые формы с применением аддитивных технологий для получения мастер-модели. Рассматриваемая деталь относится к классу корпусных деталей и она представлена на рисунке 1.

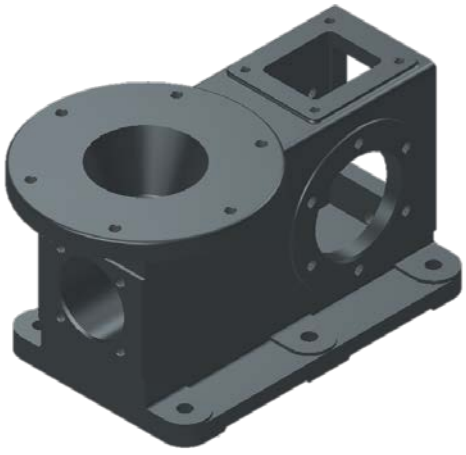


Рис. 1. 3D-модель детали «Корпус насоса»

Материалом для подобных деталей чаще всего выступает чугун или сталь, также часто корпуса насосов делают литыми, либо сваривают между собой несколько деталей, которые создают один целый корпус.

Развитие трёхмерных CAD/CAM/CAE-технологий привело к существенной модернизации современного литейного и, в первую очередь, опытного производства.

В наше время в литейном производстве все чаще прибегают к внедрению аддитивных технологий [4-7]. Например, авторы работы [6] рассматривают для примера изготовление стержневого ящика с помощью аддитивных технологий.

Применение аддитивных технологий позволяет в краткие сроки изготавливать необходимые детали с помощью имеющихся 3D-моделей, описывающих формы любой сложности. С помощью 3D-печати можно изготавливать мастер-модели из воска или полистирола, которые в значительной мере ускоряют производство, уменьшают необходимое время для доработки формы для отливки.

Также аддитивные технологии используются при литье в песчано-глинистые формы. При помощи 3D-принтера изготавливаются различные матрицы, описывающие форму будущего изделия, формы для песчаных вставок и стержней, которые необходимы для соблюдения внутренних поверхностей детали при литье изделий сложной формы. Способ изготовления матриц при помощи 3D-принтера является наиболее приемлемым относительно дерева, поскольку является более дешевым при возможности достижения аналогичной точности.

В связи с выше сказанным, целью исследования является: изучение особенностей применения аддитивных технологий в заготовительном производстве, в частности, получения мастер-модели в литейном производстве на примере детали «Корпус плунжерного насоса».

Объект исследования: технологическая операция получения заготовок при применении аддитивных технологий.

Предмет исследования: показатели формирования литейных матриц для детали «Корпус плунжерного насоса».

Материал и методы исследования. При проведении исследования были применимы методы анализа, синтеза и обобщения, основы технологии машиностроения и заготовительного производства. Программные средства: CAD – программа Autodesk Inventor; программа SolidWorks Plastics. В качестве станка послойного наращивания материала был выбран 3D-принтер Geralkom-3D Vector-300. В процессе печати было использовано латунное сопло с проходным диаметром 0,4 мм. Для подготовки деталей к 3D-печати на FDM принтере была использована программа – слайсер Ultimaker Cura.

Результаты исследования и их обсуждения . Деталь «Корпус плунжерного насоса» является корпусной и совмещающей в себе три главных отверстия, одно – коническое, два – квадратных отверстия и внутреннюю полость, необрабатываемые после отливки. Также в основании корпуса присутствует полость, облегчающая деталь, которая после отливки также не обрабатывается.

На рисунке 2 указана 3D-модель заготовки с указанием полостей, заполняющимися песчаными стержнями (вставками) перед отливкой.

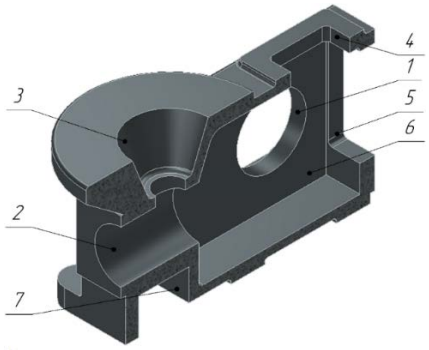


Рис. 2. 3D модель заготовки в разрезе

На рисунке 2 представлены следующие позиции: 1 – Одно из двух главных отверстий, находящихся на одной оси, после отливки получается при помощи специального армированного стержня. 2 – Главное отверстие, после отливки получается при помощи специального армированного стержня. 3 – Коническое отверстие, после отливки получается при помощи вставки, изготовляемой в специальной форме. 4 – Квадратное отверстие смотрового люка, после отливки получается при помощи вставки соответствующей формы. 5 – Квадратное отверстие монтажного люка, после отливки получается при помощи вставки соответствующей формы. 6 – Внутренняя полость, обеспечивающая закрытую работу механизма внутри корпуса, после отливки получается при помощи вставки, изготовляемой в специальной форме. 7 – Полость, обеспечивающая облегчение детали, после отливки получается при помощи вставки, изготовляемой в специальной форме. В ходе анализа конструкции изделия было принято решение использовать несколько видов матриц, описывающих формы детали.

Все матрицы, полученные посредством аддитивных технологий, можно разделить на два вида: 1 – Матрицы формы детали; 2 – Матрицы под песчаные стрежни (вставки). В таблице 1 представлены необходимые матриц для изготовления детали.

Таблица 1

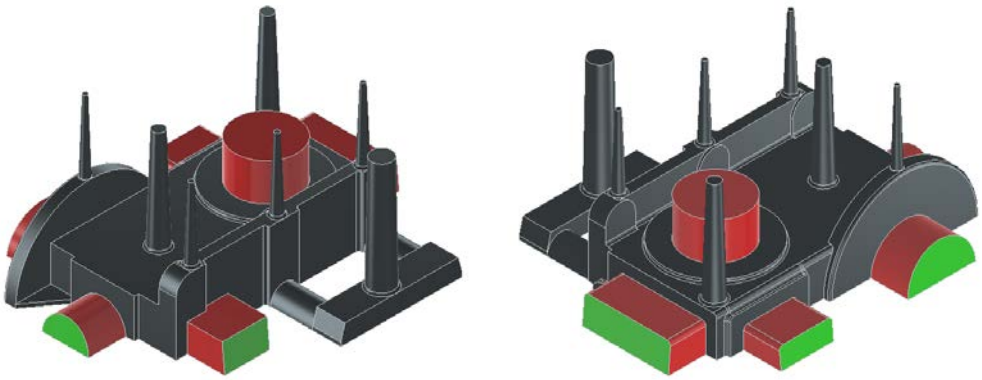
Необходимые матрицы для изготовления детали

№	Тип матрицы	Назначение
1	Матрица формы детали	Описывает весь внешний контур изделия и литейные знаки
2	Матрица под песчаные стрежни	Описывает форму цилиндрического стрежня
3	Матрица под песчаные стрежни	Описывает внутреннюю геометрию детали
4	Матрица под песчаные стрежни	Описывает геометрию полости для уменьшения металлоемкости детали

Матрицы изготавливаются из пластика, обеспечивая приемлемую точность для выполнения отливок в песчано-глинистые формы при меньшей себестоимости матриц для формирования как мастер-модели, так и песчаных стержней относительно стандартных матриц из дерева.

Для изготовления матрицы формы детали была выполнена половина модели заготовки с размещением специальных вставок (см. рисунок 3), которые при формовании песчаной модели будут образовывать литейные знаки. Данные вставки обозначаются красным цветом. Также на данной модели предусмотрены формовочные уклоны, на модели отмечены зеленым цветом, как представлено на рисунке 3.

На данной матрице помимо специальных вставок, отмеченных красным цветом, также предусмотрены элементы литниковой системы. В местах, где наблюдаются перепады высот, а также в массивных местах отливки предусмотрены выпоры – специальный элемент литниковой системы, предназначенный для вывода газов из формы, контроля заполнения формы расплавленным металлом, а также для предупреждения образования усадочных раковин под выпорами.



а ***б***

Рис. 3. Твердотельная модель матрицы формы детали: а – вид спереди; б – вид сзади

Один из самых важных элементов литниковой системы – стояк или заливная горловина – элемент системы, исполненный в данном случае в виде вертикального конусного канала. Стояк предназначен для подачи расплавленного металла к другим элементам системы. Вместе со стояком предусматривается литниковая чаша, которая служит для смягчения удара струи жидкого металла, а также для задержания шлака, но данная чаша образует отрицательный угол, потому было принято решение образовать литниковую чашу непосредственно в песчаной литьевой форме.

В данной модели расположено два питателя – элемента литниковой системы, которые предназначены для подвода расплавленного металла в полость литейной формы. Площадь сечения питателя должна быть меньше площади сечения шлакоуловителя, что выполняется в данной модели.

Также на матрице формы детали расположена разделительная плита, на которой расположены отверстия для точного ориентирования опок между собой при формовке.

На рисунке 4 представлена матрица формы детали с обозначением всех элементов литниковой системы за исключением литниковой чаши, поскольку она не предусмотрена в детали для предупреждения образования отрицательных углов в модели.

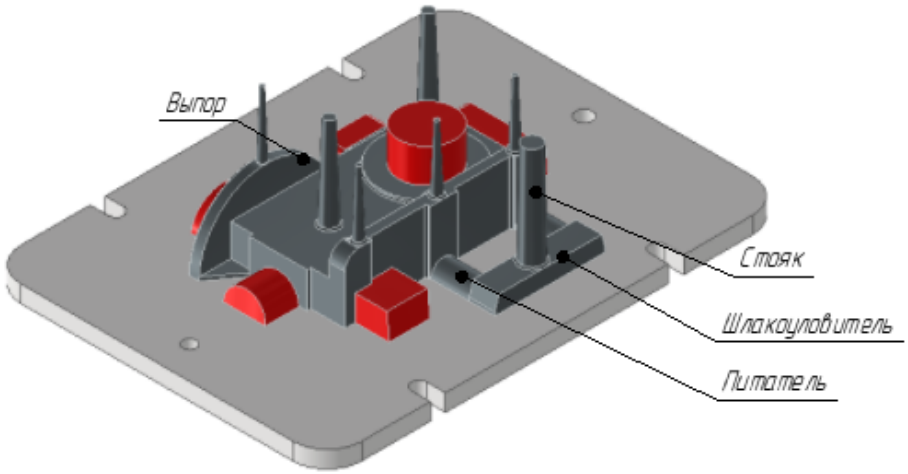


Рис. 4. Матрица формы детали с обозначением элементов литниковой системы

Аналогичным способом выполняется ответная часть матрицы формы детали, отличием является то, что в ответной части не предусмотрен стояк и выпоры, поскольку они всегда расположены только с одной стороны.

После сборки матрицы внутри образуется полость необходимой формы – цилиндр, в которую засыпается песок с последующей формовкой. После ручной формовки матрица разбирается. Твердотельная модель матрицы для цилиндрического песчаного стержня представлена на рисунке 5.



Рис. 5. Твердотельная модель матрицы для цилиндрического песчаного стержня

Матрица для формирования стержня, описывающего внутреннюю геометрию детали, представляет вытряхную матрицу или вытряхной стержневой ящик. Для формирования песчаного стержня выполняется ручная формовка с последующим вытряхиванием получившегося стержня. Внутренняя полость условно разделена на две части, потому данный стержень необходимо изготовить два раза для получения полноценного песчаного стержня. Твердотельная модель матрицы для песчаного стержня, описывающего внутреннюю геометрию детали, представлена на рисунке 6.

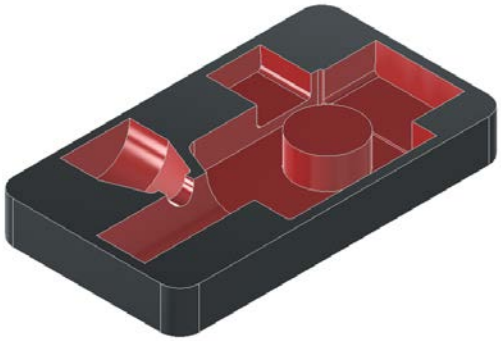


Рис. 6. Матрица для песчаного стержня, описывающего внутреннюю геометрию детали

Матрица для формирования стержня, описывающего геометрию полости, обеспечивающую уменьшение металлоемкости детали, представляет собой также вытряхную матрицу, но из-за простой геометрии нет необходимости разделять данный стержень на две части, вследствие чего после удаления получившегося песчаного стержня из матрицы, данный стержень является готовым к сборке.

В данном исследовании для изготовления матриц используется метод FDM-печати. Способ позволяет производить детали практически любой геометрии.

Для печати рассматриваемой детали оптимальным выбором выступает пластик PLA. Данный вид пластика обладает высокой твердостью и хорошей спекаемостью – температура плавления 173-178°С, пластик не токсичный при плавлении, а также после застывания в модели достаточно легко удаляются поддержки, если таковые образуются в процессе печати.

Для печати рассматриваемой детали пластиком PLA выбраны параметры, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры в процессе печати

Параметр	Значение
Высота слоя, мм	0,2
Высота первого слоя, мм	0,3
Ширина линии, мм	0,4
Ширина линии стенки, мм	0,4
Ширина линии дна/крышки, мм	0,4
Ширина линии заполнения, мм	0,4
Ширина линии юбки/каймы, мм	0,4
Ширина линии поддержки, мм	0,4
Толщина стенки, мм	1,6
Количество линий стенки, шт	4
Длина перехода к стенке, мм	0,4
Толщина дна/крышки, мм	1,0
Слои дна/крышки, шт	5
Шаблон для крышки/дна, начального слоя	Зигзаг
Плотность заполнения, %	10
Дистанция линий заполнения, мм	4,0
Шаблон заполнения	Гироид
Тип прилипания к столу	Кайма
Минимальная длина каймы, мм	250,0
Ширина каймы, мм	8,0

Количество линий каймы, шт	15
Охлаждение, %	100
Скорость перемещения печатной головки, м/с	50
Температура стола, °С	60
Температура сопла, °С	205

Значения в таблице являются настраиваемыми параметрами в программе Ultimaker Cura и определяют время печати, количество затрачиваемого материала, жесткость детали, чистоту поверхности детали и прочие важные показатели. Следовательно, для различных материалов, используемых при печати и деталей различного назначения следует тщательно подбирать параметры печати.

Поскольку матрица формы детали является сборной конструкцией, были выполнены построения нескольких моделей с последующей сборкой.

На рисунке 7 представлена модель сборочной единицы матрицы формы детали в программе Ultimaker Cura в оптимальном положении для корректной печати с минимальным количеством поддержек для лучшей чистоты поверхности детали.

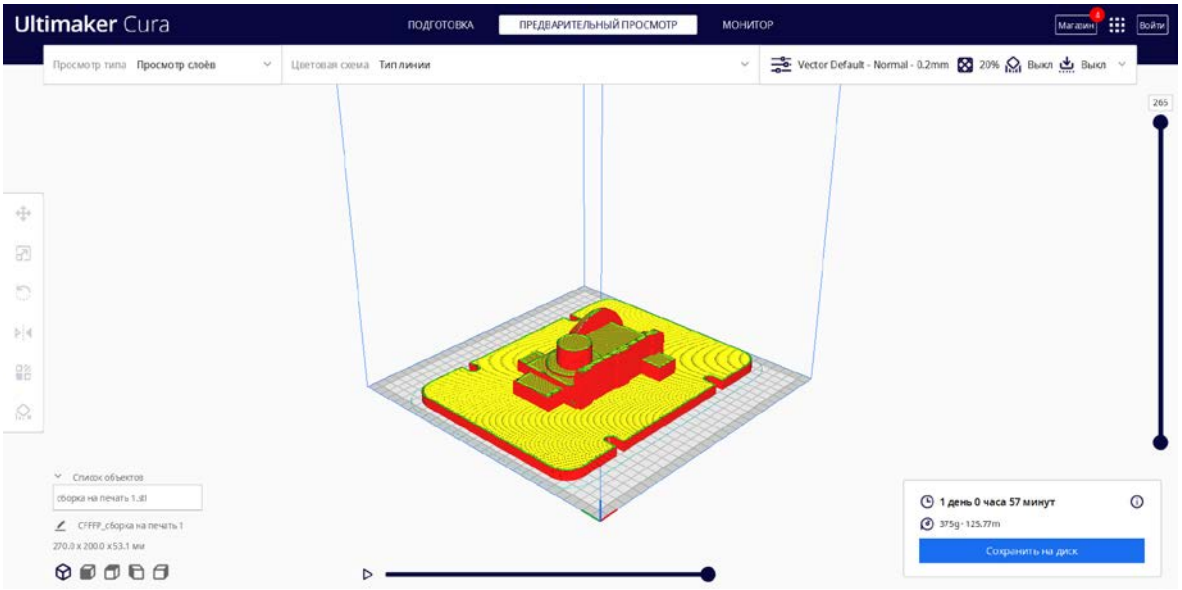


Рис. 7. Модель в Ultimaker Cura

На изображении видно, что программа отображает приблизительное время печати, а также количество затрачиваемого материала. Файл сохраняется с управляющей программой для 3D-принтера на внешний носитель. На рисунке 8 представлен фрагмент управляющей программы для станка послойного наращивания материала.

```
;FLAVOR:Marlin
;TIME:89860
;Filament used: 125.769m
;Layer height: 0.2
;MINX:4.8
;MINY:39.8
;MINZ:0.3
;MAXX:295.2
;MAXY:260.2
;MAXZ:53.1
;ZOFFSETPROCESSED
;Generated with Cura_SteamEngine 5.2.1
M140 S65
M105
M190 S65
M104 S210
M105
M109 S210
M82 ;absolute extrusion mode
G28
G90
G1 F1800 X119.885 Y161.18 E1014.26591
G1 F1800 E1013.36591
G0 F7200 X138.921 Y141.749
G1 F1800 E1014.26591
G1 X134.74 Y137.569 E1014.46255
;TIME_ELAPSED:89860.445976
G1 F1800 E1013.56255
M140 S0
M107
M104 S0
M140 S0
;Retract the filament
G92 E1
G1 E-1 F300
G28 X0 Y0
M84
M109 R80
M81
M82 ;absolute extrusion mode
M104 S0
;End of Gcode
```

Рис. 8. Часть управляющей программы для печати модели корпуса

Готовая модель матрицы формы детали после сборки представлена на рисунке 9.

Аналогичным методом происходит изготовление всех матриц. На рисунке 10 представлены все остальные матрицы, необходимые для процесса литья, изготовленные аддитивным методом.

Для изготовления отливки в условиях единичного производства с целью экономии материалов и трудозатрат было принято решение изготавливать деталь в масштабе 1:2,5. Также было необходимо при воспроизведении процесса литья отказаться от использования чугуна в качестве основного материала отливки по причинам высокой температуры плавления – 1250℃, а также существенного вреда органам дыхания от использования данного материала при литье.

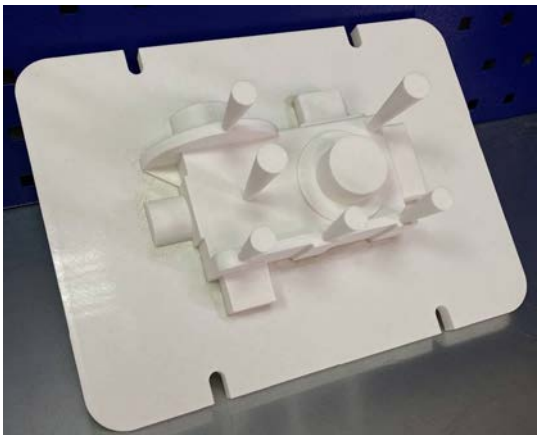
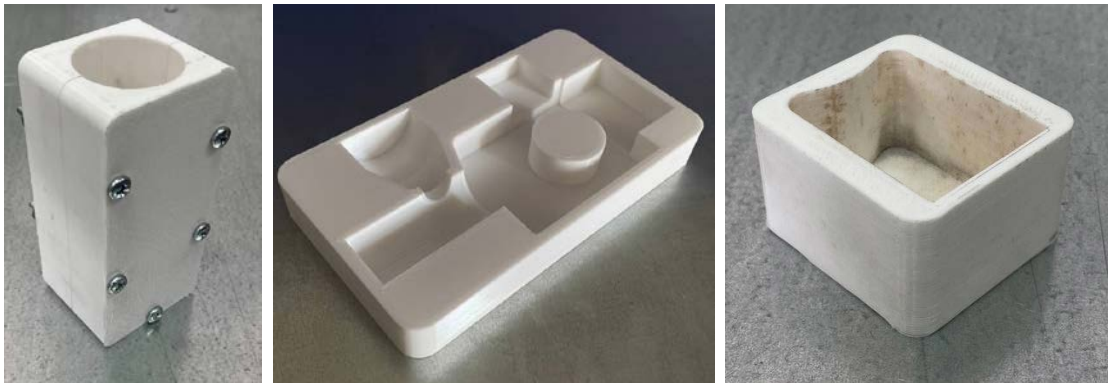


Рис. 9. Матрица формы детали



а ***б*** ***в***

Рис. 10. Матрицы, изготовленные аддитивным методом: а – матрица для цилиндрического стержня; б – матрица для песчаного стержня, описывающего внутреннюю геометрию детали; в – матрица для песчаного стержня, описывающего геометрию полости для уменьшения металлоемкости

Для проверки корректности спроектированной литниковой системы необходимо смоделировать процесс отливки. Для этого будет использоваться программа SolidWorks Plastics. Данный модуль предусмотрен для моделирования процессов отливки пластика, но задав необходимые параметры температуры в 1250℃, что является температурой плавления чугуна, можно получить график времени заполнения литьевой формы. Данный график необходим для проверки правильности выполнения литейной оснастки, ведь слишком долгое время заполнения негативно скажется на качестве отливки. На рисунке 11 представлен график времени заливки расплавленного металла в форму.

Дополнительно был проведен расчет времени кристаллизации полученного расплава. Результат расчета представлен на рисунке 12.

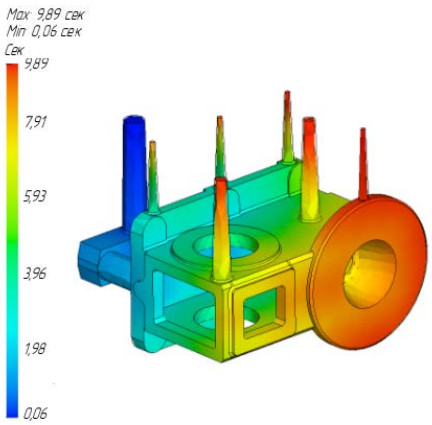


Рис. 11. График времени заливки расплавленного металла в форму

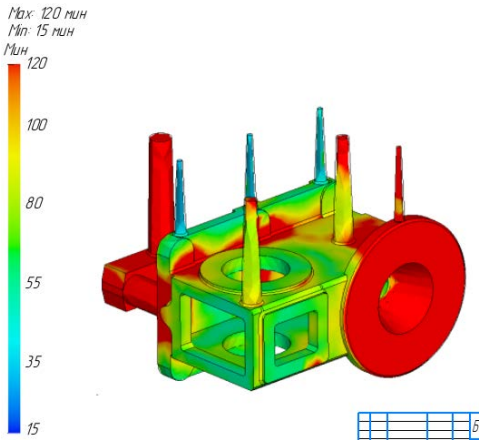


Рис. 12. График времени кристаллизации расплава

Выводы:

1. В данной исследовании удалось добиться создания литейной оснастки для изготовления заготовки для детали «Корпус плунжерного насоса» с применением аддитивных технологий. Литейная оснастка спроектирована с учетом формовочных уклонов для хорошей формовки песчаной модели, а также ее удалении из формы. Также литейная оснастка предусматривает в себе стандартные элементы, такие как стояк или заливная горловина, литниковая чаша, шлакоуловитель, питатели, выпоры.

2. На изготовление одного полного комплекта литейной оснастки ушло около 850 грамм пластика и 57 часов печати. Данные значения действительны при применении одного FDM-принтера, при условии печати каждого фрагмента отдельно и при таком положении деталей, при котором печать происходит с наименьшим формированием поддержек. Данный процесс можно значительно сократить, используя большее количество принтеров и/или формируя процесс печати нескольких моделей одновременно.

3. Перед процессом сборки песчаной литьевой формы необходимо обеспечить дополнительные условия для удобного удаления матрицы. Чтобы песок отделился от матрицы после формовки, его необходимо предварительно покрыть небольшим слоем талька.

4. Исследуемый способ эффективен в создании моделей со сложной конфигурацией, поскольку имеет возможность создания матриц любой формы.

Список литературы

1. Чуваев И.А., Габельченко Н.И. Термическая обработка 3D печатных изделий из пластмасс // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 6 (84). Часть 1. С. 70-75.

2. Зоренко Д.А., Фадина Д.С. Особенности применения аддитивных технологий в производстве корпусных элементов компактных редукторов // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2021. № 27. С. 16-20.

3. Смирнов В.В., Барзали В.В., Ладнов П.В. Перспективы развития аддитивного производства в российской промышленности // Опыт ФГБОУ УГАТУ. Новости материаловедения. Наука и техника. №2 (14). 2015. С. 23-27.

4. Смуров И.Ю., Конов С.Г., Котобан Д.В. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 2. С. 11-22.

5. Демидов А.В. Использование аддитивных технологий в литейном производстве, для оптимизации процесса изготовления изделия // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2024. Т. 9 № 2(40). С. 118–122.

6. Корбанов В. Д. Изготовление модельной оснастки в литейном производстве с применением аддитивных технологий / В. Д. Корбанов, А. И. Вальтер // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 10. С. 334-338.

7 Митраков Г. Н. Использование аддитивных технологий при литье по выжигаемым моделям / Г. Н. Митраков, С. Н. Евдокимов, Е. Г. Лавриков, В. С. Сазонов // Омский научный вестник. 2015. № 2 (140). С. 80-84.

Темпель Юлия Александровна, канд. техн. наук, доцент, tempeljulia@mail.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Митрохин Сергей Иванович, студент, Mitrokhinserega@mail.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет

STUDY OF THE APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR OBTAINING A MASTER MODEL IN FOUNDRY PRODUCTION

Yu.A. Tempel, S.I. Mitrokhin

One of the local innovations in blank production is the use of additive technologies in the formation of blank equipment. Additive technologies allow obtaining different shapes of models, in connection with which the consideration of the topic is a topical issue in the manufacture of parts of complex configuration. As part of the research, a foundry equipment for casting

in sand-clay molds using additive technologies was developed. Using layer-by-layer material build-up machines, simulated matrices were created that facilitate both the formation of an imprint in a casting sand mold and the formation of sand cores, which form cavities in the casting during metal pouring. Object of study: technological operation of obtaining blanks using additive technologies. Subject of study: indicators of the formation of casting matrices for the part "Plunger pump body".

Key words: foundry, master models, additive technologies, 3-D printing, mechanical engineering, sand-clay molds.

Tempel Yulia Aleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, tempeljulia@mail.ru, Russia, Tyumen, Tyumen industrial university,

Mitrokhin Sergey Ivanovich, student, Mitrokhinserega@mail.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University

УДК 655.222.343
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-418-419

ТЕРМИЧЕСКАЯ ЗАКАЛКА ПЛАСТИКОВЫХ СТЕРЖНЕЙ, НАПЕЧАТАННЫХ МЕТОДОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПОСЛОЙНОГО НАНЕСЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Д.Е. Писарев, С.И. Митрохин, А.С. Губенко, У.С. Путилова

Промышленное производство широко развивается в настоящий момент времени. Целью любого предприятия является повышение производительности и получение прибыли с минимальными затратами. Для реализации данных задач разрабатываются новые методы, материалы, средства, программы инновационного развития. В работе рассмотрены технологии аддитивного производства, а именно FDM-печать. Представлены результаты сравнения прочностных характеристик методом растяжения, как закаленного изделия, так и образца, не подвергающегося термическому воздействию.

Ключевые слова: пластик, термическая обработка, прочностные характеристики пластика, ABS, PETG, PLA.

Аддитивное производство в настоящее время содержит множество различных технологий печати. В работе рассматривается наиболее распространенная – FDM-печать, часто применяющаяся в промышленном производстве, а также при изготовлении небольших партий изделий. Данная технология представляет собой нанесение расплавленного материала в несколько слоев по установленному алгоритму, что позволяет значительно сократить время на изготовление готовой продукции.

Применительно к литейному производству 3D печать в основном применяется для создания модельных комплектов, форм и так далее [1]. Однако при изготовлении моделей фасонных отливок зачастую прочность моделей является неудовлетворительной, и при хранении и установке моделей в форму может происходить их повреждение ввиду недостаточной прочности [2]. При создании изделий из пластика методом FDM-печати существует недостатки, которые влияют на качество готового продукта, например деформации в виде натёков, неровных краев и углов, а также различных пор.

Для устранения данной проблемы существует два метода:

– предварительное просушивание сырья для устранения влаги;

– термическая обработка пластика, а именно закалка готового изделия.

В вязи с выше сказанным, тема является актуальной, что подчеркивается исследованиями авторов в таких работ как [1-5], в которых представлены исследования ударопрочности изделий, напечатанных на 3D-принтере [4], исследования комплекса характеристик базовых материалов для FDM технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства [5].

Закалка пластмасс представляет собой нагрев до температуры, составляющей 80-90% от температуры плавления.

В работе закалка осуществляется в пределах температуры стеклования – температуры, при которой не кристаллизующееся или не успевающее закристаллизоваться вещество становится твердым, переходя в стеклообразное состояние – начиная от нижнего порога температуры стеклования и немного повышая температуру. Данное решение обосновывается тем, что при нагреве изделия из пластика выше температуры стеклования, материал сохраняет эластичность и не крошится при ударе или изгибе.

Материал и методы исследования. При проведении экспериментов и обработки результатов были применимы методы анализа и обобщения, программные продукты: Компас-3D, Ultimate Cura и MS Excel.

Результаты исследования и их обсуждения. В данной работе термической обработке подвергалось три вида пластика – PLA, ABS и PETG. Все изделия, независимо от материала, изготовлены методом горизонтального послойного нанесения материала. На рисунке 1 наглядно представлено расположение слоев при печати изделий.

Данные виды пластика обладают разными свойствами, отражающимися как на процессе изготовления, так и на готовом изделии. Также различается и температура стеклования, что говорит о необходимости использования разной температуры при термической обработке данного материала.

Кроме того, стоит отметить, что, во время проведения эксперимента, изделия подвергались термической обработке различными промежутками времени – 3, 5 и 7 минут соответственно. Данное решение было принято в целях наибольшей информативности результатов эксперимента.

После термической обработки изделий и их полного остывания, изделия помещались в универсальную разрывную машину для исследования приобретенных прочностных характеристик.

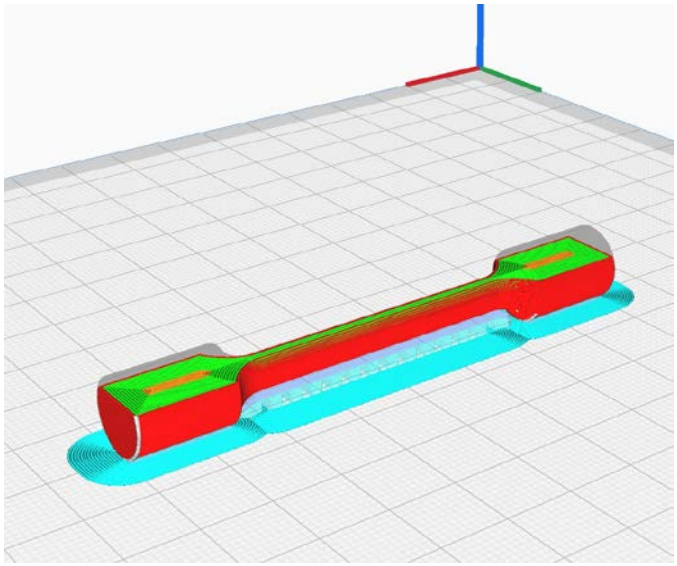


Рис. 1. Расположение слоев при изготовлении испытуемых изделий

При термообработке изделия из пластика PLA нагрев осуществлялся по трем значениям – 60, 65 и 70 градусов по Цельсию (температура стеклования – 60-65 градусов по Цельсию).

В таблице 1 отображены результаты максимально прилагаемых усилий на изделие.

В каждом температурном диапазоне получены максимальные и минимальные значения усилий, отмечены зеленым и красным цветом соответственно.

Таблица 1

Максимальное усилие на изделие из PLA, Н

PLA макс. усилие, Н			
Время, мин	Температура,		
	60	65	70
3	1080	1080	1120
5	1120	1150	1080
7	1140	1080	1160
Незак. стержень	1130	1130	1130

При разных прилагаемых усилиях наблюдается различное перемещение деформируемого изделия. В таблице 2 представлены значения перемещений в момент максимально прилагаемого усилия, а также максимальное перемещение стержня, независимо от прилагаемого усилия.

Таблица 2

Перемещение деформируемого изделия из PLA, мм

PLA перемещение на макс. усилии, мм				PLA макс. перемещение стержня, мм			
Время, мин	Температура, ℃			Время, мин	Температура, ℃		
	60	65	70		60	65	70
3	4,65	4,35	3,9	3	4,95	4,8	4,8
5	4,7	3,85	5,3	5	5,4	4,22	5,75
7	4,6	3,9	4,4	7	5,4	4,75	5,1
Незак. стержень	3,8	3,8	3,8	Незак. стержень	4,5	4,5	4,5

Наблюдается наибольшее перемещение при пятиминутном нагреве материала при температуре 70 градусов в 5,75 мм.

Таким образом, из полученных значений для приобретения наилучших показателей эластичности, изделию из PLA необходим нагрев до температуры 70℃ в течение 5 минут.

При термообработке изделия из пластика ABS, нагрев осуществлялся по трем значениям – 100, 103 и 105 градусов по Цельсию (температура стеклования – около 105 градусов по Цельсию).

В таблице 3 отражены результаты максимально прилагаемых усилий на изделие.

По аналогии с предыдущим образцом цветовая гамма характеризует те же показатели. Так, наибольшее значение усилий в пределах 900-910 Н, а минимальное составило 840 Н.

Значения перемещений в момент максимально прилагаемого усилия, а также максимальное перемещение стержня, независимо от прилагаемого усилия, представлено в таблице 4.

Таблица 3

Максимальное усилие на изделие из ABS, Н

ABS макс. усилие, Н			
	Температура, ℃		
Время, мин	100	103	105
3	840	900	850
5	880	870	840
7	910	870	840
Незак. стержень	900	900	900

Таблица 4

Перемещение деформируемого изделия из ABS, мм

ABS перемещение на макс. усилии, мм				ABS макс. перемещение стержня, мм			
	Температура, ℃				Температура, ℃		
Время, мин	100	103	105	Время, мин	100	103	105
3	3,05	3,4	3,05	3	3,48	5,65	3,4
5	3,8	4	4,2	5	4,52	4,35	18,05
7	3,6	2,8	3,3	7	5,3	7,05	16,3
Незак. стержень	2,95	2,95	2,95	Незак. стержень	3,42	3,42	3,42

По результатам данных, заметен наилучший результат перемещения при максимальном усилии после термообработки при температуре 105 градусов в течение 5 минут, также необходимо отметить и результат при температуре 103℃ в течение этого же времени.

Таким образом, при совокупности показателей перемещения при максимальном усилии и максимальному перемещению деформируемого изделия, наилучшие показатели эластичности изделия из ABS получены при нагреве до 105℃ в течение 5 минут.

При термообработке изделия из пластика PETG нагрев осуществлялся по трем значениям – 80, 85 и 90 градусов по Цельсию (температура стеклования – около 88 градусов по Цельсию).

Результаты усилий на изделие из пластика PETG представлены в таблице 5.

Таблица 5

Перемещение деформируемого изделия из PETG, мм

PETG макс. усилие, Н			
	Температура, ℃		
Время, мин	80	85	90
3	1060	1020	1040
5	1040	1020	1040
7	1020	1020	1040
Незак. стержень	1080	1080	1080

По аналогии с предыдущими образцами, при разных прилагаемых усилиях наблюдается различное перемещение деформируемого изделия. В таблице 6 представлены значения перемещений в момент максимально прилагаемого усилия, а также максимальное перемещение стержня, независимо от прилагаемого усилия.

Таблица 6

Перемещение деформируемого изделия из PETG, мм

PETG перемещение на макс. усилии, мм				PETG макс. перемещение стержня, мм			
	Температура, ℃				Температура, ℃		
Время, мин	80	85	90	Время, мин	80	85	90
3	5,8	4,5	4,8	3	65,8	35,5	41,5
5	3,6	4,5	4,8	5	6,7	14,3	25,6
7	5	4,6	4,55	7	19,8	7,9	4,6
Незак. стержень	4,3	4,3	4,3	Незак. стержень	4,35	4,35	4,35

Таким образом, для достижения наибольшего показателя эластичности изделием из PETG, необходим нагрев при температуре 80 градусов в течение 3 минут.

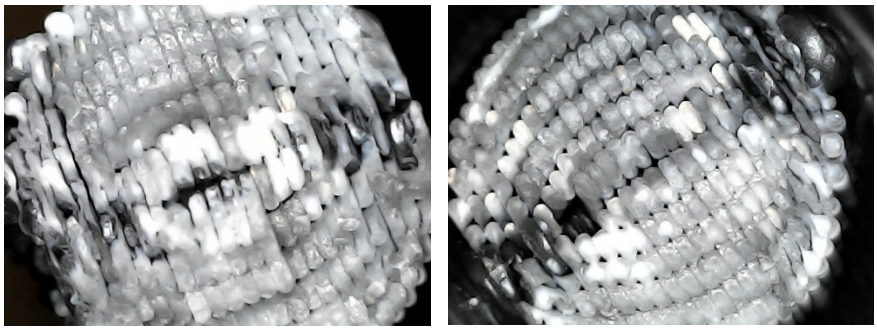
В ходе проведения экспериментов, после разрыва изделия, появилась возможность зафиксировать структуру материала на сломе изделия. На рисунках 2,3,4 представлены структуры изделий из пластиков до и после термической обработки.

Для сравнения были зафиксированы структуры изделий из PLA – до термической обработки и после нагрева до температуры 70 градусов в течение 5 минут.

Для сравнения были зафиксированы структуры изделий из ABS – до термической обработки и после нагрева до температуры 105 градусов в течение 5 минут.

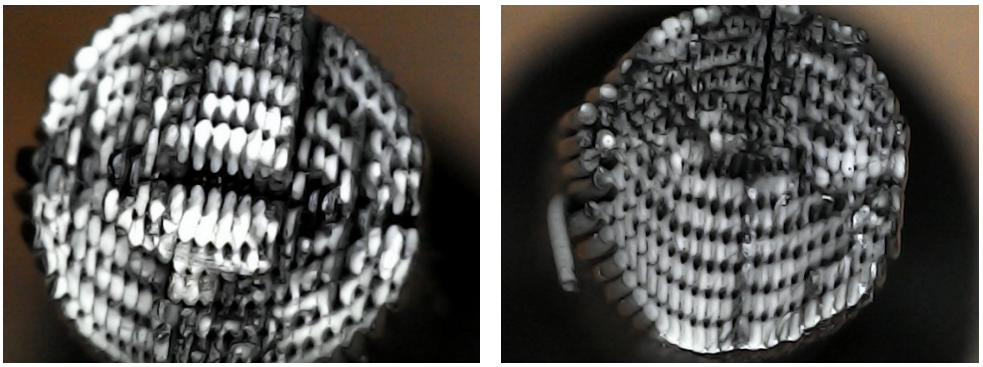
Для сравнения были зафиксированы структуры изделий из PETG – до термической обработки и после нагрева до температуры 80 градусов в течение 3 минут.

Образцы, применяемые для сравнения структурной сетки изделия, были отобраны на основании проведенного эксперимента – изделия, продемонстрировавшие наилучшие показатели эластичности после термической обработки, сравнивались с незакаленным образцом.



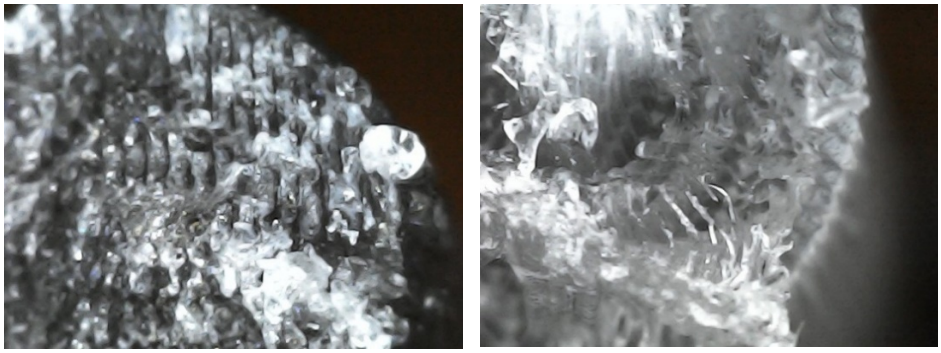
1 ***2***

Рис. 2. Изделие из PLA в сломе: 1 – структура материала незакаленного изделия; 2 – структура материала изделия после термообработки



1 ***2***

Рис. 3. Изделие из ABS в сломе: 1 – структура материала незакаленного изделия; 2 – структура материала изделия после термообработки



1 ***2***

Рис. 4. Изделие из PETG в сломе: 1 – структура материала незакаленного изделия; 2 – структура материала изделия после термообработки

Выводы:

1. Проведены различные степени закалки нескольких изделий, выполненных из разных материалов с последующим экспериментом на разрыв с целью выявить изменения в структуре и поведении материала при задании нагрузок.

2. Зафиксированы структуры материала, как незакаленного изделия, так и изделия, подвергшегося термической обработке, а также оптимальные параметры закалки (время и температура), позволяющие значительно повысить эластичные характеристики изделия.

Список литературы

1. Белов Д.А., Бычкова А.Н., Климовцова И.А. // Материалы, технологии, инструменты. 2006. Т. 11. № 2. С. 56.

2. Чуваев И.А., Габельченко Н.И. Термическая обработка 3D печатных изделий из пластмасс / Чуваев И.А., Габельченко Н.И. // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 6 (84). Часть 1. С. 70-75.

3. Зоренко Д.А., Фадина Д.С. Особенности применения аддитивных технологий в производстве корпусных элементов компактных редукторов // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2021. № 27. С. 16-20.

4. Ошеко Р.А. Исследование ударопрочности изделий, напечатанных на 3D-принтере в зависимости от диаметра сопла // Modern Science. 2019. № 5-3. С. 274-278.

5. Петрова Г.Н., Платонов М.М., Большаков В.А., Пономаренко С.А. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства // Пластические массы. 2016. № 5-6. С. 53-58.

Писарев Дмитрий Евгеньевич, студент, Pisarevde@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Митрохин Сергей Иванович, студент, Mitrokhinserega@mail.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Губенко Арсений Сергеевич, ассистент-стажер, Gubenkoas@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Путилова Ульяна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, putilovaus@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет

THERMAL HARDENING OF PLASTIC RODS PRINTED BY THE METHOD OF HORIZONTAL LAYER-BY-LAYER APPLICATION OF MATERIAL

D.E. Pisarev, S.I. Mitrokhin, A.S. Gubenko, U.S. Putilova

Industrial production is developing widely at the present time. The goal of any business is to increase productivity and generate profits at minimal cost. To implement these tasks, new methods, materials, tools, innovative development programs are being developed. The paper considers additive manufacturing technologies, namely FDM printing. The results of comparing the strength characteristics by the tensile method of both a hardened product and a sample not subjected to thermal action are presented.

Key words: plastic, heat treatment, strength characteristics of plastic, ABS, PETG, PLA.

Pisarev Dmitry Evgenievich, student, Pisarevde@tyuiu.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University,

Mitrokhin Sergey Ivanovich, student, Mitrokhinserega@mail.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University,

Gubenko Arseniy Sergeevich, assistant, Gubenkoas@tyuiu.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University,

Putilova Ulyana Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, Putilovaus@tyuiu.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University

УДК 621
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-422-423

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О.А. Темпель, Ю.А. Темпель

В настоящее время предприятия машиностроения с целью сохранения ресурсов и повышения объема производства применяют новые технологии, инструменты, средства, а также автоматизированные платформы, которые позволяют управлять и поддерживать производственные и технологические процессы. Технологическая система является совокупностью всех средств технологического оснащения и предметов труда, направленных на регламентированное выполнение технологических процессов и операций. Поэтому обеспечение надежности технологических систем является важной задачей. Оценка таких систем проводится по различным зависимостям и формулам, основные методы и средства которых описаны в нормативно-технической документации. При выборе метода оценки надежности таких систем необходимо освоить значительный объем информации и данных. Поэтому актуальной задачей является систематизация информации по методам и расчетам оценки надежности технологических систем, чтобы структурировать и облегчить работу специалистов предприятия.

Ключевые слова: показатели, надежность, технологическая система, обработка результатов, автоматизированная платформа расчетов.

Производственные процессы являются сложным комплексом технологических операций и процессов и связанными с ними технологическими системами на различных уровнях предприятия [1].

От надежности технологической системы зависит множество процессов, поэтому осуществляют ее оценку, которая на предприятиях проводится различными способами, методами и средствами. Большинство из данных инструментов занимает значительное время для расчета и обработки данных. Следовательно, затраченное время замедляет процесс решения проблем и проведения корректирующих мероприятий.

Предлагается платформа по автоматизированному расчету показателей надежности, долговечности и безотказности с сохранением полученных результатов в базе данных.

Материал и методы исследования. При проведении исследования использованы результаты теоретических исследований различных авторов в данной тематике [1-3]; методы по анализу и синтезу информации; средства в виде компьютерных технологий.

Результаты исследования и их обсуждения. Существуют различные методы и средства по оценке надежности и точности технологических систем, которые стандартизованы.

Все системы характеризуются определенным уровнем надежности, при этом возможны их отказы и необходимо их обслуживание. Если отказы системы возникают слишком часто, то она либо не сможет выполнять требуемые функции, либо устранение этих отказов занимает значительное количество материальных и трудовых ресурсов. Кроме того, при частых отказах система получает низкую оценку потребителя и вряд ли будет приобретена снова, когда потребуется ее замена. С другой стороны, проектирование и производство систем с высоким уровнем безотказности может быть дорогостоящим, и производить такие системы по экономическим причинам будет нецелесообразно (ГОСТ 27.003).

Таким образом, существует необходимость в оценке надежности систем, чтобы сохранить ресурсы предприятия и своевременно провести корректирующие и предупреждающие мероприятия.

В настоящее время широкое применение нашли такие методы как, расчетный, регистрационный, опытно-статистический и экспертный. Краткое описание методов приведено на рисунке 1.



Рис. 1. Методы оценки надежности технологических систем

Каждый метод или инструмент по расчету показателей надежности, долговечности, ремонтопригодности и безотказности регламентирован стандартами и техническими рекомендациями. Нормативно-техническая документация содержит большой объем данных, который предлагается систематизировать в виде алгоритмов и блок-схем. Карточки стандартов в виде блок-схем позволят улучшить процесс обмена информацией между специалистами предприятия, в кратчайшие сроки проводить расчет показателей и формировать своевременно корректирующие мероприятия.

В работе представлены фрагменты платформы автоматизированного расчета оценки надежности технологических систем по параметрам производительности, качества и функционирования изделий или технологических систем.

На рисунке 2 представлен интерфейс главного окна, который выполнен через коды программы Basic и позволяет автоматически переходить на вкладку необходимого расчета.

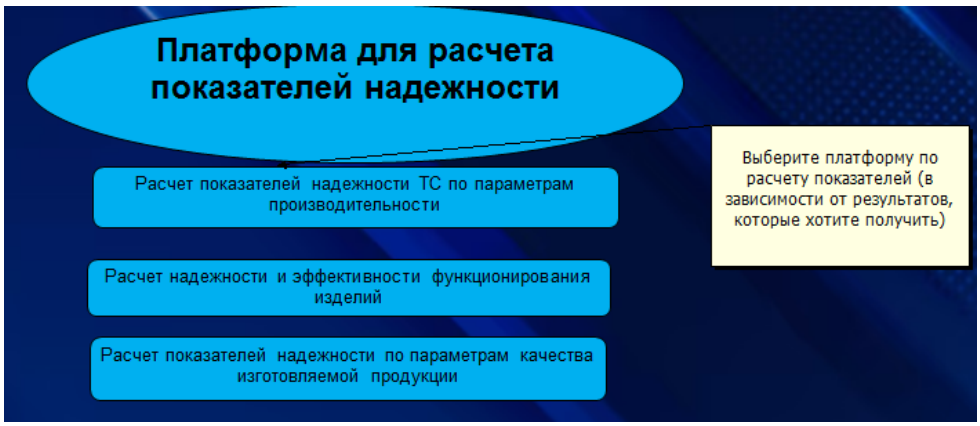


Рис. 2. Платформа автоматизированного расчета показателей надежности

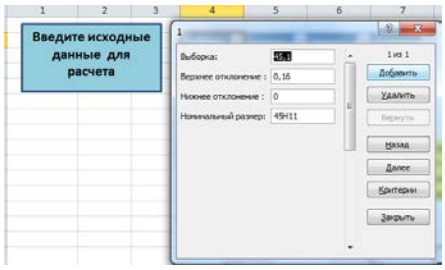


Рис. 3. Пример окна для заполнения исходных данных

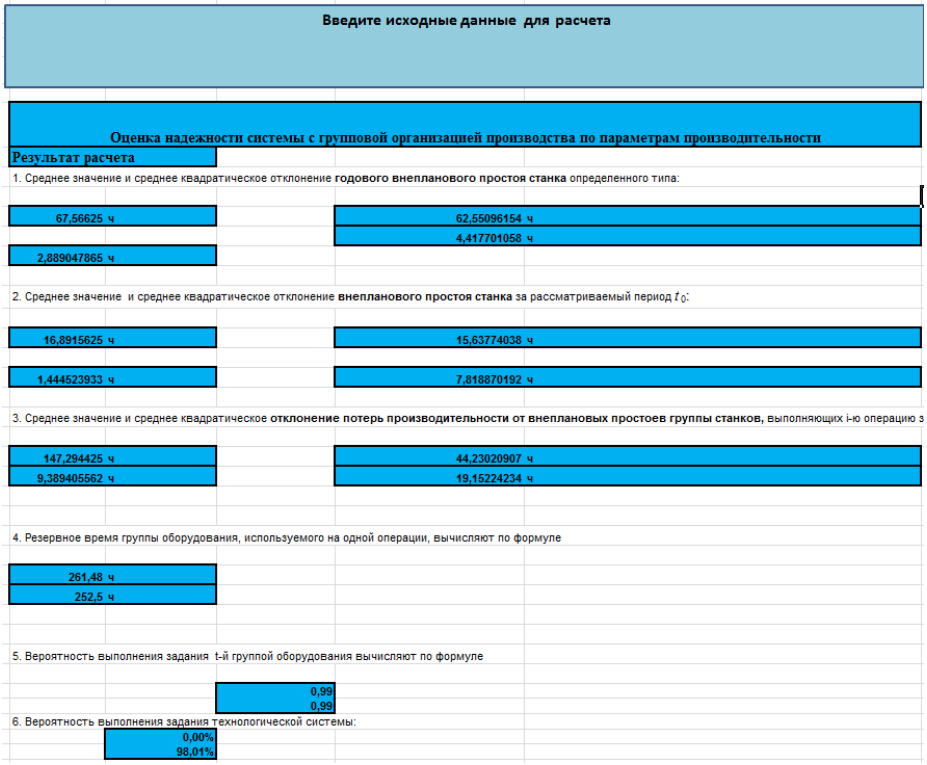


Рис. 4. Пример вывода результатов

Специалист предприятия непосредственно осуществляет подбор необходимого метода в зависимости от ситуации и вида оценки технологической системы, оборудования или изделия.

Далее осуществляется заполнение исходной информации с помощью, которой программа начнет расчет, как представлено на рисунке 3. Все окна с исходной информацией должны быть заполнены, чтобы корректно отобразить результаты расчета.

На рисунке 4 представлен фрагмент программы с выводом результата.

Платформа позволяет сохранять результаты в формате Excel, Word и PDF, таким образом, специалист в случае неопределенной ситуации всегда сможет вернуться к начальному этапу.

Так же, разработан календарный график работ по внедрению и реализации работ на предприятиях машиностроения по рассматриваемой теме. График представлен на рисунке 5.

Для осуществления такого вида работ необходимо около 3 месяцев, чтобы провести обзор существующей ситуации на предприятии в области технологических систем и оборудования. Осуществить выбор методов оценки показателей надежности и запустить программу для проверки настройки и целостности данных.



Рис. 5. План-график работ по внедрению и реализации рассматриваемой платформы

Выводы. Таким образом, формирование автоматизированной платформы по оценке надежности технологических систем и оборудования позволит проводить расчет показателей в кратчайшие сроки с минимальными затратами. Платформа способна сохранять и исправлять информацию в базе данных, а так же удобна и проста в использовании.

Список литературы

1. Ширяева Е.Н., Полякова М.А. Особенности оценки надежности технологических и технических систем в действующей нормативной документации // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №3. С. 60-71.

2. Лаврищева Е.М., Зеленов С.В. Методы оценки надежности программных и технических систем / Е.М. Лаврищева, С.В. Зеленов и др. // Труды ИСП РАН, 2019. Том 31. Вып. 5. С. 95-108.

3. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем [Электронный ресурс] URL: https://s.science-education.ru/pdf/2015/1/266.pdf (дата обращения: 15.08.2024).

4. ГОСТ 27.203-83. Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности: межгосударственный стандарт: издание официальное: утв. и введ. в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 9 сентября 1983 г. № 4161: введ. впервые: дата введ. 1984-07-01 / разработан Государственным комитетом СССР по стандартам. Москва, 1983. 8 с.

5. РД 50-581-85 Методические указания. Надежность в технике. Технологические системы. Отработка на надежность. - Текст: электронный // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: официальный сайт. 2020. [Электронный ресурс] URL: http://docs.cntd.ru/document/1200024406 (дата обращения: 15.08.2024).

6. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения: межгосударственный стандарт: издание официальное: утв. и введ. в действие постановлением Комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации от 26июня 1996 г. № 430: взамен ГОСТ 27.410-87: дата введ. 1997-01-01 / разработан МТК 119 "Надежность в технике". / ИПК Издательство стандартов, 1996. [Электронный ресурс] URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294827/4294827550.pdf (дата обращения:15.08.2024).

Темпель Ольга Александровна, старший преподаватель, tempel_o@mail.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Темпель Юлия Александровна, канд. техн. наук, доцент, tempeljulia@mail.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет

IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF CALCULATING THE RELIABILITY OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS

O.A. Tempel, Yu.A. Tempel

At present, mechanical engineering enterprises use new technologies, tools, means, and automated platforms that allow managing and supporting production and technological processes in order to conserve resources and increase production volumes. A technological system is a set of all technological equipment and labor objects aimed at the regulated implementation of technological processes and operations. Therefore, ensuring the reliability of technological systems is an important task. Such systems are assessed using various dependencies and formulas, the main methods and means of which are described in regulatory and technical documentation. When choosing a method for assessing the reliability of such systems, it is necessary to master a significant amount of information and data. Therefore, an urgent task is to systematize information on methods and calculations for assessing the reliability of technological systems in order to structure and facilitate the work of enterprise specialists.

Key words: indicators, reliability, technological system, processing of results, automated calculation platform.

Tempel Olga Aleksandrovna, senior lecturer, tempel_o@mail.ru, Russia, Tyumen, Tyumen industrial university,

Tempel Yulia Aleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, tempeljulia@mail.ru, Russia, Tyumen, Tyumen industrial university

УДК 621.791.9; 621.7-52
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-426-427

ПРОГРАММНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОГО РЕЖИМА АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Д.Д. Какорин, Б.И. Марголис, А.Ю. Лаврентьев

В статье описан процесс моделирования и программной оптимизации температурно-временного режима аддитивного производства металлических изделий. Обоснованы преимущества применения разработанной программы в процессе послойного наплавления. Приведена структура программы, схема её работы и основные модули. За счет модульной системы программа позволяет производить моделирование температурного поля с учетом всех особенностей аддитивного производства. Подробно описана работа модуля идентификации весовых коэффициентов в точке контакта расплавленного и основного металла, а также коэффициента вынужденной конвекции. Описана процедура моделирования температурного поля и оптимизации температурно-временного режима послойного наплавления металлического изделия.

Ключевые слова: программная оптимизация, математическое моделирование, идентификация, технологический процесс, аддитивное производство, температурное поле, температурно-временной режим.

В процессе аддитивного производства металлических изделий основное внимание уделяется качеству формирования геометрии слоя и внутренней структуре наплавленного металла [1]. Наибольшее влияние на качество наплавленного металла оказывает температурно-временной режим послойного наплавления, который включает параметры источника электрического тока и портального манипулятора для перемещения рабочего органа – сварочной горелки.

К параметрам источника электрической энергии относятся сила тока I, напряжение дуги U, а также скорость $v_{пр}$ и режим подачи присадочной проволоки. В совокупности перечисленные параметры определяют количество энергии, подаваемое в зону наплавления металла посредством электрической дуги. Данная энергия расходуется на нагрев и оплавление присадочной проволоки и металла основания.

Параметры манипулятора определяют траекторию и скорость движения источника тепловой энергии, длительность этапов наплавления слоя и межслойной выдержки наплавленного металла [2].

Цель исследования. Для обеспечения требуемого качества наплавляемого изделия необходимо подобрать такое соотношение параметров источника электрического тока и портального манипулятора, при котором температура металла на всех этапах производства будет находиться в установленном диапазоне граничных значений температур $T_н$ и $T_в$ [3].

Наиболее простым методом оптимизации температурно-временного режима послойного наплавления является практическая отработка технологии, заключающаяся в изготовлении серии образцов на оптимальном режиме источника тока с постоянным мониторингом температуры наплавленного металла и поэтапным изменением времени межслойной выдержки [4]. В зависимости от геометрии изготавливаемой детали ручная оптимизация температурно-временного режима до 10 раз превышает время наплавления одного изделия и сопровождается нерациональным использованием основных и вспомогательных материалов, существенными трудовыми, энергетическими и материальными затратами [5].

Повысить эффективность ручной оптимизации возможно за счет разработанной авторами программы для численного моделирования температурного поля и оптимизации температурно-временного режима аддитивного производства. Применение средств математического моделирования позволит избежать материальных затрат в процессе оптимизации и значительно увеличить скорость отработки технологии послойного наплавления металлических изделий.

Однако для успешного использования программы моделирования и оптимизации в реальном технологическом процессе необходимо подробно рассмотреть этапы послойного наплавления металла, оценить потенциал и целесообразность их автоматизации.

Таким образом, целью исследования является разработка метода программного моделирования и оптимизации температурно-временного режима аддитивного производства для обеспечения требуемого термического цикла наплавленного металла в зависимости от выбранной марки и диаметра присадочной проволоки, критических температур стали, а также граничных значений температурного распределения.

Структура программы для моделирования и оптимизации аддитивного производства. В основе разработанной программы лежит численный конечно-разностный метод моделирования температурного поля. Моделируемое изделие разбивается по длине и высоте на множество точек с шагом 0,001 м и образует сетку модели, а искомые значения температур T_{i+1} рассчитываются на основании температур в предыдущий момент времени T_i [6, 7]. Для решения дифференциального уравнения теплопроводности (1) частные производные по времени 1-го порядка и по координатам 2-го порядка заменены на их численные аналоги:

$$\frac{\partial T(x,z,\tau)}{\partial \tau} = a \cdot \left[\frac{\partial^2 T(x,z,\tau)}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T(x,z,\tau)}{\partial x^2} \right]. \quad (1)$$

Производная перового порядка температуры по времени представлена выражением (2):

$$\frac{T_{i+1}(j,r) - T_i(j,r)}{\Delta \tau}. \quad (2)$$

Частные производные второго порядка температуры по длине и высоте изделия заменены на их численные аналоги с учетом отличий в механизмах теплообмена у внутренних точек наплавленного металла и у внешних точек конструкции. Внутренние точки контактируют только с окружающим их металлом, и передача тепла осуществляется за счет кондуктивного теплообмена (3, 4):

$$\frac{T_i(j,r-1)-2T_i(j,r)+T_i(j,r+1)}{\Delta L^2}, \quad (3)$$

$$\frac{T_i(j-1,r)-2T_i(j,r)+T_i(j+1,r)}{\Delta L^2}. \quad (4)$$

Внешние точки конструкции обмениваются тепловой энергией как с соседними точками, так и с окружающей средой. Поэтому механизм теплообмена включает не только теплопроводность, но и конвективный теплообмен с окружающей средой (5-8):

$$\frac{T_i(j,1)-T_i(j,0)}{\Delta L^2}, \quad (5)$$

$$\frac{T_i(j,N_3-1)-T_i(j,N_3)}{\Delta L^2}, \quad (6)$$

$$\frac{T_i(1,r)-T_i(0,r)}{\Delta L^2}, \quad (7)$$

$$\frac{T_i(N-1,r)-T_i(N,r)}{\Delta L^2}. \quad (8)$$

На основании приведенных численных аналогов частных производных (2-8) составлен ряд уравнений теплопроводности, описывающих температурное распределение по длине и высоте наплавляемой детали. Использование явной численной схемы позволяет рассчитать температурное поле как с учетом постоянного добавления новых частей конструкции в процессе послойного наплавления, так и для стационарной конструкции в период межслойной выдержки.

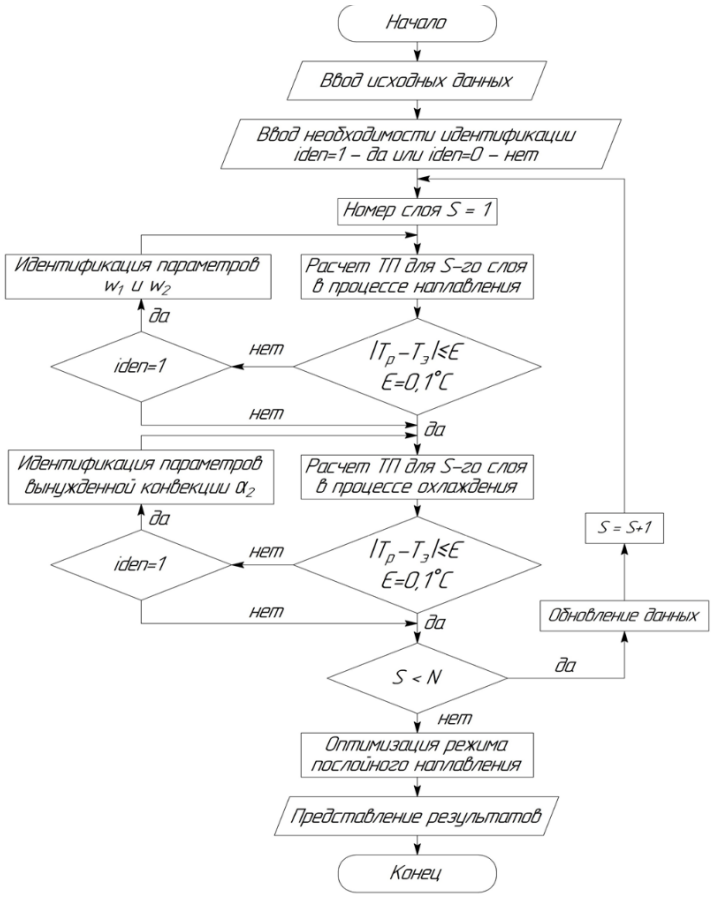


Рис. 1. Схема программы моделирования и оптимизации процесса аддитивного производства металлических изделий

Разработанная программа включает основную функцию для ввода исходных данных, представления графического интерфейса, вызова дополнительных функций и вывода результатов расчета. Функция *TempSurfacing* используется для расчета температурного поля в период послойного электродугового наплавления присадочной проволоки. Расчет производится по длине и высоте наплавленной части слоя, металлического основания и новой части наплавляемого слоя, соответствующей размерам, капли расплавленного металла ΔB. Функция *TempRest* позволяет произвести расчет температурного поля в период межслойной выдержки, когда наплавленное изделие остывает за счет естественного или искусственного конвективного теплообмена поверхности изделия с окружающей средой. Функция *TempDepend* обновляет теплофизические свойства наплавленного металла (коэффициенты температуропроводности a, теплопроводности λ и теплоемкости C) в зависимости от его температуры.

Дополнительно разработаны модули *Iden1* и *Iden2* для идентификации параметров теплообмена в зависимости от установленных граничных значений температур и введенных исходных данных о процессе аддитивного производства. Для устранения возможных отклонений расчетных и экспериментальных температур в программе предусмотрена возможность подбора весовых коэффициентов металла основания w_1 и присадочного металла w_2, характеризующих интенсивность внутреннего теплообмена в точке контакта наплавленной части металла с металлом основания. Для периода отпуска идентифицируется коэффициент вынужденной конвекции α_2, характеризующий интенсивность конвективного охлаждения стационарной наплавленной конструкции. Применение модулей *Iden1* и *Iden2* позволяет минимизировать отклонение расчетных и экспериментальных температур до 0,1 ºС.

Сочетание перечисленных модулей позволяет производить моделирование температурного поля с учетом послойного добавления материала, принудительного охлаждения металла в процессе межслойной выдержки, изменяющейся геометрии наплавляемого изделия и параметров установки для послойного электродугового наплавления присадочной проволоки. Схема работы программы представлена на рис. 1.

В соответствии с приведенной схемой программа выполняет моделирование температурного поля и оптимизацию температурного временного режима послойного наплавления с установленными коэффициентами теплообмена при условии, что исходные данные о процессе послойного наплавления соответствуют использованным ранее параметрам.

Моделирование температурного поля и оптимизация температурно-временного режима послойного наплавления производится с обновленными исходными данными. Дополнительно выполняется идентификация параметров теплообмена для процессов послойного наплавления и межслойного охлаждения, а также моделирование температурного поля с исходными данными, близкими к данным, которые использовались в процессе практической отработки программы. В данном случае используются известные коэффициенты теплообмена, а для изделий большей высоты применяются установившиеся параметры теплообмена при послойном наплавлении металла.

Использование программы в реальном производстве позволит оптимизировать процесс аддитивного производства с учетом всех особенностей послойного наплавления, включая диаметр присадочной проволоки и установленные граничные значения температур в конце этапа наплавления слоя и межслойной выдержки [8, 9].

Технологически процесс аддитивного производства металлического изделия. Для эффективной практической реализации разработанной программы необходимо детально изучить технологический процесс послойного электродугового наплавления и выделить этапы с наибольшими затратами трудовых и временных ресурсов [10, 11].

В соответствии с описанной структурой установки для послойного наплавления металлических изделий большая часть производственного процесса автоматизирована за счет использования числового программного управления оборудованием для перемещения сварочной горелки [12].

Набольший интерес для внедрения средств программной автоматизации представляет этап подготовки технологической документации, а именно процесс определения оптимального температурно-временного режима послойного наплавления в зависимости от исходных данных о процессе наплавления и установленных граничных значений температур. Упрощенная схема технологического процесса представлена на рис. 2.

Процесс оптимизации температурно-временного режима заключается в поиске сочетания параметров источника тока и движения горелки, при которых устанавливается требуемое качество внутренней структуры металла и достигается требуемая геометрия наплавленной конструкции. При этом временные характеристики процесса определяются траекторией и скоростью перемещения сварочной горелки и включают время наплавления одного слоя $\tau_н$, интервал межслойной выдержки $\tau_в$ и общее время послойного наплавления τ.



Рис. 2. Схема технологического процесса аддитивного производства

Применение программной оптимизации в процессе подготовки технологической документации позволит модернизировать процесс аддитивного производства, сократить затраты времени на экспериментальную отработку технологии и свести к минимуму расходы основных и вспомогательных материалов [13, 14].

Оптимизация температурно-временного режима аддитивного производства. Процесс программной оптимизации состоит из нескольких этапов. В первую очередь необходимо определить исходные данные о наплавляемом изделии, включая последовательность наплавления как для конструктивных элементов в рамках одного слоя, так и для всей конструкции. На основании выбранной последовательности устанавливается порядок выполняемого программой расчета.

Далее записываются исходные данные о геометрии наплавляемого изделия и каждого конструктивного элемента. С учетом заданной толщины слоя определяется диаметр присадочной проволоки $d_{пр}$, сила тока I, напряжение электрической дуги U и скорость подачи проволоки $v_{пр}$. Геометрические характеристики, необходимые для моделирования температурного распределения, включают длину металлического основания B_1, длину наплавляемого слоя B_2, расстояние от края основания до начала слоя ΔB, толщину металлического основания L_1, толщину наплавленного слоя L_2 и количество наплавляемых слоев S.

Затем на основании выбранной марки присадочной проволоки определяют температуры её критических точек и устанавливают граничные значения термического цикла послойного наплавления – температуру в конце наплавления слоя $T_н$ и в конце этапа межслойной выдержки $T_в$. Устанавливается начальный интервал межслойной выдержки $\tau_в$ в диапазоне 100-150 с., время наплавления слоя τ_s, коэффициенты конвективного теплообмена в процессе наплавления α_1 = 12 Вт/(м^2·К) и в период межслойной выдержки с учетом принудительного охлаждения металла α_2 = 300 Вт/(м^2·К).

После ввода исходных данных о наплавляемом изделии осуществляется моделирование температурного поля и вывод результатов в табличном и графическом виде (рис. 3). На графике выводятся модели температурных полей для различных моментов времени послойного наплавления по длине и высоте конструкции.

Полученные результаты моделирования сопоставляются с граничными значениями температур. При обнаружении отклонения расчетных и граничных значений выполняется процедура оптимизации времени межслойной выдержки $\tau_в$, заключающаяся в повторном моделировании температурного поля с поэтапным изменением времени выдержки. Оптимизация производится до тех пор, пока температура металла в конце наплавления и отдыха не будет находиться в установленном диапазоне граничных температур [15].

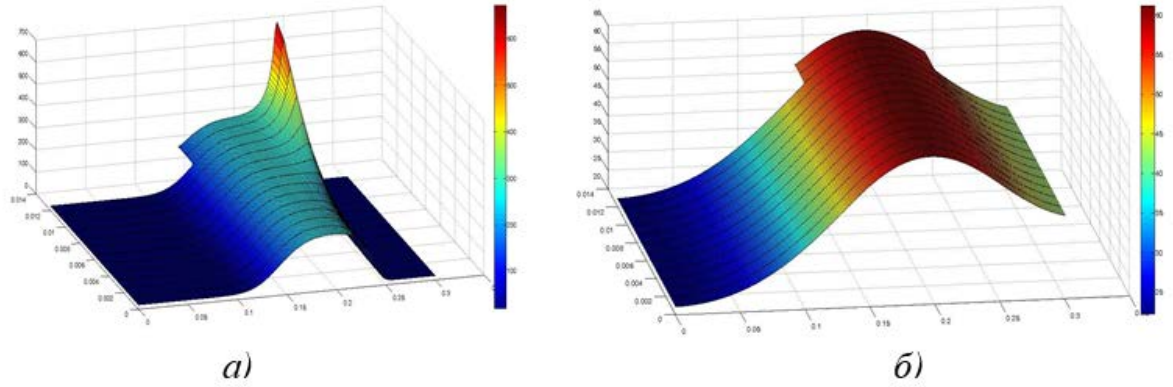


Рис. 3. Результат моделирования температурного поля: а – в конце наплавления слоя; б – в конце этапа межслойной выдержки

Таким образом, применение программы моделирования и оптимизации температурно-временного режима технологического процесса аддитивного производства металлических изделий позволяет повысить общий уровень автоматизации производственного процесса, избежать материальных затрат на экспериментальную отработку режимов послойного наплавления, сократить трудоемкость оптимизации и уменьшить затраты на амортизацию оборудования.

Заключение. В статье описаны возможности использования программы моделирования и оптимизации температурно-временного режима аддитивного производства. Приведена структура программы и ей функциональные возможности. Рассмотрено используемое в процессе моделирования температурного поля дифференциальное уравнение теплопроводности и приведены численные аналоги частных производных по времени и координатам.

Рассмотрены основные варианты работы программы с учетом использования уже известных параметров режима аддитивного производства, обновленных исходных данных, а также для случаев, когда высота изделия превышает шесть наплавленных слоев и используются установившиеся параметры теплопроводности.

Приведена схема технологического процесса аддитивного производства, представлено место разработанной программы и выполнена оценка ожидаемого эффекта от автоматизации этапа ручной оптимизации температурно-временного режима.

Описан процесс программной оптимизации температурно-временного режима. В результате оценки полученных результатов было установлено, что применение программы в процессе оптимизации позволяет избежать затрат основных и вспомогательных материалов, сократить трудоёмкость поиска оптимального режима и уменьшить затраты на амортизации технологического оборудования.

Список литературы

1. Чабаненко А.В. Управление качеством аддитивного производства // Стандарты и качество. 2024. № 7. С. 92-98.

2. Чабаненко А.В. Обеспечение качества аддитивного производства посредством моделирования процессов печати // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 33-39.

3. Ананьева Т.В. Оптимизация производственного процесса с применением аддитивных технологий / Т. В. Ананьева, Ю. А. Бордюгова // Академическая наука - проблемы и достижения: Материалы XXX международной научно-практической конференции. Bengaluru, India: Pothi.com, 2022. С. 160-165.

4. Какорин Д.Д. Оптимизация режимов послойного наплавления для аддитивного производства металлических изделий / Д. Д. Какорин, А. Ю. Лаврентьев, Б. И. Марголис // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 550-554.

5. Чабаненко А.В. Обеспечение качества аддитивного производства посредством моделирования процессов печати // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 33-39.

6. Быков А.Н. Численное моделирование селективного лазерного плавления методом SPH / А. Н. Быков, М. Н. Вишнякова, Ю. Н. Дерюгин [и др.] // Журнал Средневолжского математического общества. 2022. Т. 24, № 4. С. 419-435.

7. Сметанников О.Ю. Численное моделирование процесса промежуточной проковки наплавляемых изделий в ANSYS Mechanical APDL (Implicit analysis) / О. Ю. Сметанников, Д. Н. Трушников, А. А. Анисимов// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2022. № 4. С. 148-162.

8. Ключко А.Д. Аддитивные технологии и эффективность их использования в производстве/А. Д. Ключко, Г. А. Гареева, Д. Р. Григорьева// Символ науки: международный научный журнал. 2018. № 1-2. С. 27-29.

9. Васянькин А.В. Эффективность аддитивного производства в изготовлении аэрокосмических компонентов // Аллея науки. 2023. Т. 1, № 2(77). С. 452-456.

10. Подлескин А.О. Аддитивное производство в машиностроении: анализ экономической эффективности селективного лазерного сплавления / А. О. Подлескин, И. И. Курбангалиев, В. С. Лобанов // Наука ТТИ НИЯУ МИФИ 2024: Сборник научных трудов. Челябинск: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2024. С. 78-84.

11. Власенков А.Н. Аддитивные технологии как метод повышения эффективности машиностроительного производства // Современные тенденции развития экономики и образования региона: Сборник трудов V Региональной научно-технической конференции. Москва: ООО «Издательство «Мир науки», 2021. С. 9-12.

12. Какорин Д.Д. Способ аддитивного производства металлических изделий / Д. Д. Какорин, А. Ю. Лаврентьев, Б. И. Марголис // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 4. С. 75-80.

13. Лыгин Е В. Аддитивные технологии: проблемы внедрения в производство / Е. В. Лыгин, А. И. Пронин // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы Международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. С. 385-387.

14. Заровкин Д.Ю. Перспективы внедрения аддитивных технологий в производство // Литейщик России. 2021. № 6. С. 33-37.

15. Демидов А В. Использование аддитивных технологий в литейном производстве, для оптимизации процесса изготовления изделия // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2024. Т. 9, № 2(40). С. 118-122.

Какорин Даниил Дмитриевич, аспирант, kakorin0000@gmail.com, Россия, Тверь, Тверской государственный технический университет,

Марголис Борис Иосифович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, borismargolis@yandex.ru, Россия, Тверь, Тверской государственный технический университет

Лаврентьев Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, lavr_ay@mail.ru, Россия, Тверь, Тверской государственный технический университет

SOFTWARE OPTIMIZATION OF THE TEMPERATURE-TIME REGIME OF ADDITIVE MANUFACTURING METAL PRODUCTS

D.D. Kakorin, A.Yu. Lavrentiev, B.I. Margolis

The article describes the process of modeling and software optimization of the temperature-time regime of additive manufacturing of metal products. The advantages of using the developed program in the process of layered deposition are substantiated. The structure of the program, the scheme of its operation and the main modules are given. Due to the modular system, the program allows you to simulate the temperature field, taking into account all the features of additive manufacturing. The operation of the module for identifying the weight coefficients at the point of contact of the molten and base metal, as well as the coefficient of forced convection, is described in detail. The procedure for modeling the temperature field and optimizing the temperature-time regime of layered deposition of a metal product is described.

Keywords: software optimization, mathematical modeling, identification, technological process, additive manufacturing, temperature field, temperature-time regime.

Kakorin Daniil Dmitrievich, postgraduate, kakorin0000@gmail.com, Russia, Tver, Tver State Technical University

Margolis Boris Iosifovich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, borismargolis@yandex.ru, Russia, Tver, Tver State Technical University

Lavrentiev Alexey Yurievich, candidate of technical sciences, docent, lavr_ay@mail.ru, Russia, Tver, Tver State Technical University

УДК 631.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-431-432

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ НЕСВОБОДНОМ ОБЪЕМНОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ДОРНОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ВТУЛОК

А.В. Морозов, А.Н. Еремеев, Ю.С. Иванова, М.А. Карпенко, О.М. Каняева

В статье приведены данные влияния натяга при объемном электромеханическом дорновании на величину остаточных напряжений на наружных поверхностях тонкостенных стальных втулок, полученных в результате моделирования. Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния при объемном электромеханическом дорновании тонкостенных стальных втулок, установленных в стальных обоймах. Определено, что увеличение натяга при объемном электромеханическом дорновании стальных тонкостенных втулок приводит к увеличению остаточных напряжений на их наружной поверхности, в результате чего увеличивается суммарная площадь контакта. Также наблюдается, что осевые усилия при объемном электромеханическом дорновании распределяются равномерно.

Ключевые слова: тонкостенные стальные втулки, объемное электромеханическое дорнование, напряженно-деформированное состояние, натяг, остаточные напряжения, моделирование.

Отделочно-упрочняющие и формообразующие способы обработки поверхностей деталей, основанные на деформационном механизме формирования качества обработанной поверхности, позволяют существенно улучшать эксплуатационные свойства изделий. К таким способам относятся процессы электромеханического дорнования, которые подразделяются на поверхностное электромеханическое дорнование (ПЭМД) и объемное электромеханическое дорнование (ОЭМД). Главной особенностью данного способа является возможность обеспечения требуемого качества поверхностного слоя и точности отверстий без снятия стружки [1, 2, 3].

Важной задачей современной технологии машиностроения является установление обобщенных зависимостей остаточных напряжений от наиболее важных технологических параметров: режимов обработки, геометрических параметров инструмента и детали, механических и термических свойств обрабатываемого и инструментального материалов и т.д. Решение этой задачи позволит вооружить инженерно-технических работников эффективными методами регулирования остаточных напряжений, позволит назначать режимы обработки для получения благоприятных остаточных напряжений.

Особенностью несвободного ОЭМД является ограничение радиальных смещений по наружной поверхности отверстия заготовки, сопровождаемое увеличением нормальных напряжений на поверхности ее контакта с инструментом. Направление течения металла при пластической деформации может быть прямым, совпадающим с направлением движения дорна и обратным, когда металл перемещается в обратном направлении. В зависимости от направления течения ОЭМД осуществляется по схеме сжатия или растяжения [4, 5].

Форма и размеры очага деформации определяют все текущие параметры и конечные результаты процесса ОЭМД тонкостенных втулок. Предполагаем, что очаг деформации при ОЭМД в общем случае представляет собой совокупность нескольких деформированных участков (зон), контактируемых и не контактируемых с инструментом, плавно переходящих один в другой.

При решении контактных пространственных задач и исследовании напряженно-деформированного состояния тел конечных размеров сложной формы, наиболее эффективны численные методы, основанные на дискретизации с последующей кусочно-постоянной, линейной, или квадратичной аппроксимацией непрерывных функций перемещения, напряжений и деформирования. Среди численных методов указанного направления широкое распространение получил метод конечных элементов [6, 7, 8, 9]. В нем сплошное тело, разбивается на множество элементов конечных размеров, и рассматривается как совокупность этих элементов. При таком подходе, исходные дифференциальные уравнения заменяются системой алгебраических уравнений, которые определяют неизвестные параметры, а задача сводится к получению определяющих уравнений для этих параметров.

Расчет проводился в программе ANSYS 14.5.7 в среде Workbench в двухмерном виде в осесимметричной постановке.

Модель представляет собой втулку и дорн. Дорн имеет коническую форму со сферическим поясом. Диаметр дорна 30 мм, внутренний диаметр втулки меньше диаметра дорна на величину натяга, длина отверстия втулки 30 мм. Расчет проводился в промежутке времени равном 1 с (около 800 итераций).

Моделировались следующие граничные условия: подвод тепла к внешней цилиндрической грани втулки; жесткая заделка внешней цилиндрической грани втулки; отсутствие перемещения по нормали боковых поверхностей втулки; перемещение дорна вдоль оси втулки на 30 мм; запрет перемещения дорна перпендикулярно оси; начальная температура дорна составляет 22 градуса.

В расчете использовались следующие материалы: дорн ВК8, втулка сталь 40Х, корпус сталь 40Х. В процессе моделирования учитывалось изменение модуля Юнга и тепловых констант при повышении температуры.

В расчете не учитывалось локальное повышение температуры, возникающее при трении, так как в сравнении с джоулевым теплом оно не существенно. При этом учитывалось только давление, действующее на контактирующие поверхности, и относительная скорость движения. Влияние микронеровностей и фазовых превращений не учитывалось. Коэффициент перехода механической энергии в тепловую – 1; энергия распределялась одинаково между телами контакта.

Общий вид расчетных схем, используемых при моделировании, приведен на рисунке 1.

Для описания механических деформаций и тепловых нагрузок применен элемент PLANE 223.

В целом зависимость механических напряжений описывается следующим образом [10, 11]:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\}$$

где ε – линейная деформация.

Для каждого конечного элемента распределение механических напряжений выглядит следующим образом (рисунок 2).

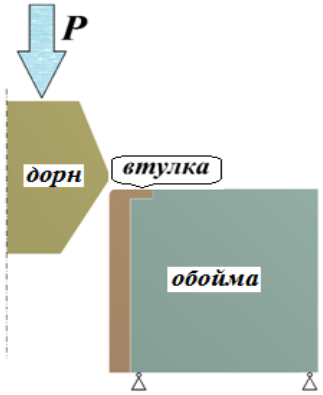


Рис. 1. Расчетная схема процесса ОМД для стальных тонкостенных втулок по схеме растяжения

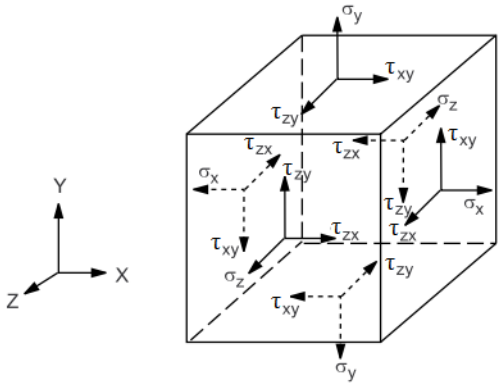


Рис. 2. Схема к расчету девиатора напряжений

В соответствие с рисунком 2, матрица жесткости имеет вид:

$$[D]^{-1}=\begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix}$$

где E – модуль Юнга, ν - коэффициент Пуассона

Для осесимметричных задач расчетная схема сводится к плоскости следующего вида

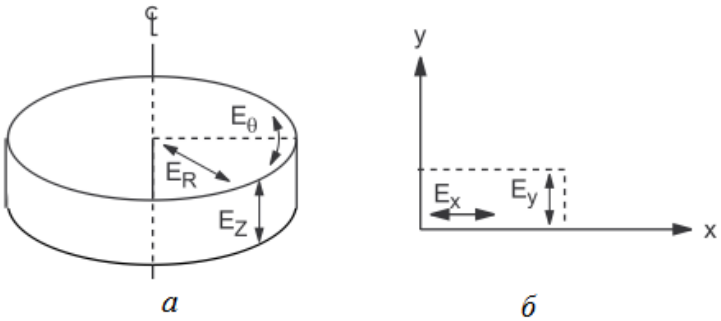


Рис. 3. Расчетные схемы: а - полярная система координат для 3-D тел; б - аксиально-симметричный элемент

На основании расчетной схемы (рис. 3) составлен девиатор напряжений:

$$[D_{R-\theta-Z}]^{-1}=\begin{bmatrix} 1/E_R & -\nu_{RZ}/E_R & -\nu_{R\theta}/E_R \\ -\nu_{ZR}/E_Z & 1/E_Z & -\nu_{Z\theta}/E_Z \\ -\nu_{\theta R}/E_\theta & -\nu_{\theta Z}/E_\theta & 1/E_\theta \end{bmatrix}$$

Эквивалентные напряжения рассчитываются по формуле:

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} \left[\left(\sigma_x - \sigma_y \right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z \right)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_x \right)^2 + 6\left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 \right) \right] \right)^{\frac{1}{2}}$$

Общий вид расчетной сетки, используемой при моделировании НДС заготовки, представлен на рисунке 4.

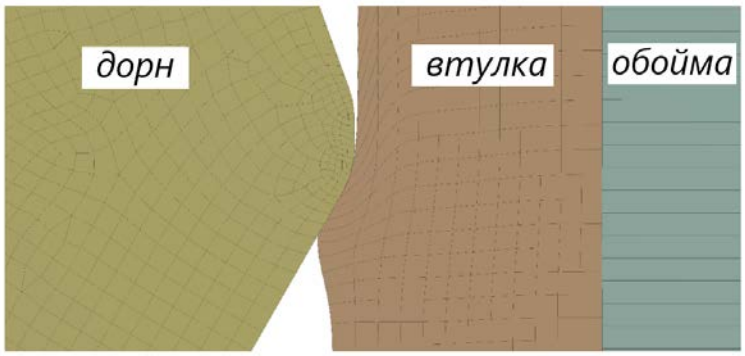


Рис. 4. Общий вид расчетной сетки

В соответствии с полученными результатами [12] была установлена степень соответствия величины натяга ПЭМД глубине залегания остаточных напряжений. Так при натяге 0,05 мм остаточные напряжения распространяются на глубину 1,6 мм от обработанной поверхности, а при натяге 1,5 мм уже на 3,9 мм.

Увеличение натяга с 0,3 мм до 0,5 мм в процессе ОЭМД приводит к повышению напряжений в контактной зоне инструмента с обрабатываемой поверхностью с 1325 МПа до 1526 МПа (рис. 5).

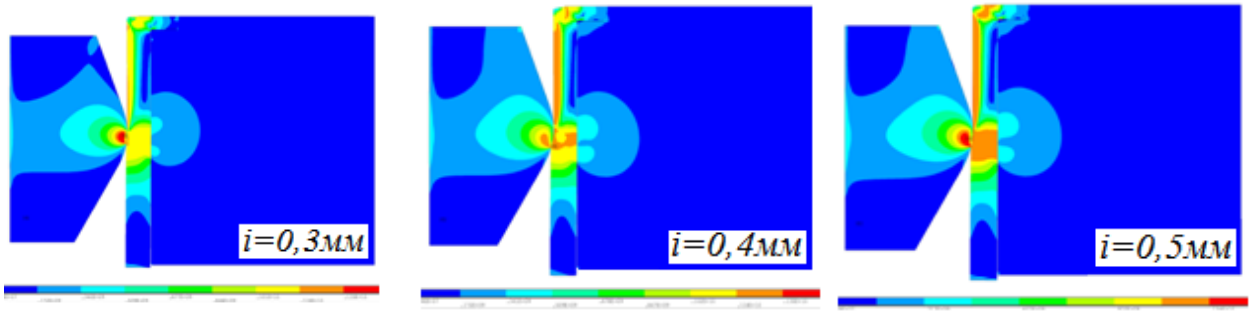


Рис. 5. Поля и интенсивности механических напряжений в тонкостенной втулке и обойме из стали 40Х в процессе ОЭМД от величины натяга i при I = 5300 А; υ = 66 мм/мин

В результате моделировании процесса ПЭМД в зависимости от величины натяга были получены кривые изменения осевого усилия по длине заготовки (рис. 6).

Установлено, что максимальное осевое усилие при установившемся процессе ОЭМД при натяге 0,3 мм составляет 2,31 кН и возрастает до 2,82 кН при натяге 0,5 мм (рис. 6).

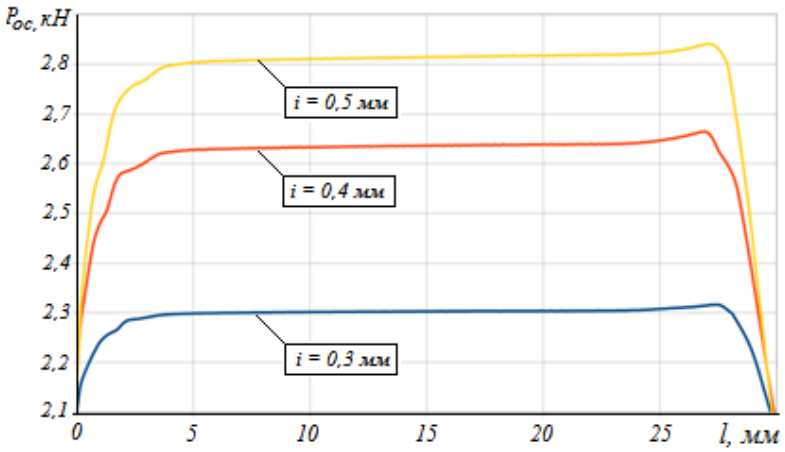


Рис. 6. Изменение осевых усилий от величины натяга i в процессе ОЭМД тонкостенной втулки из стали 40Х при I = 5300 А; υ = 66 мм/мин

В результате расчета получили распределение остаточных напряжений в тонкостенных втулках после ОЭМД в зависимости от величины натяга (рис. 7).

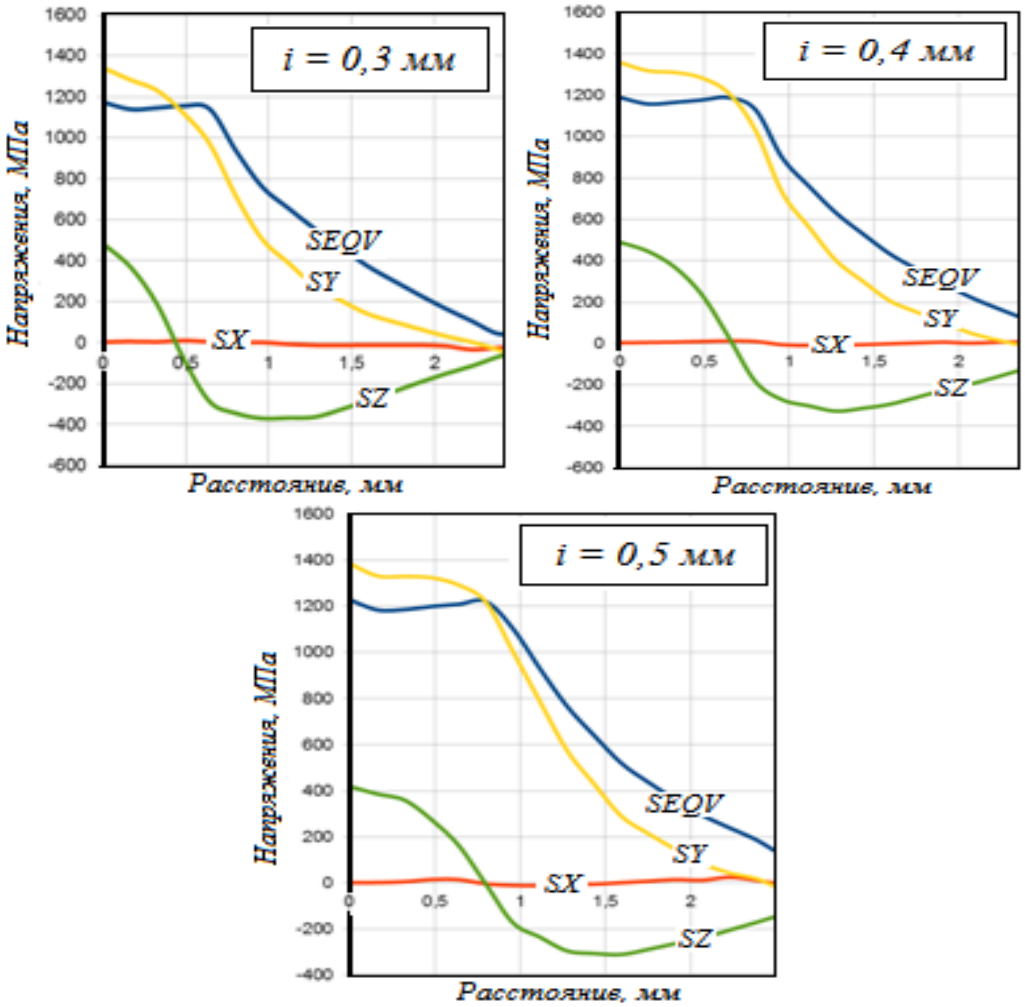


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений в зависимости от величины натяга i: SX - поперечная составляющая; SY - продольная составляющая; SZ - окружная составляющая и SEQV - эквивалентные напряжения

Увеличение натяга при ОЭМД стальных тонкостенных втулок с 0,3 до 0,5 мм приводит к увеличению остаточных напряжений на наружной поверхности с 67 МПа до 183 МПа, в результате чего увеличивается суммарная площадь контакта. Кроме того отмечается, что осевые усилия в процессе ОЭМД распределяются равномерно (рис. 7).

Моделирование НДС тонкостенных стальных втулок позволило установить степень влияния натяга ОЭМД на величину остаточных напряжений на наружных поверхностях втулок и их влияние на эксплуатационные показатели соединений.

Список литературы

1. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.

2. Багмутов В.П., Паршев С.Н., Дудкина Н.Г., Захаров И.Н. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация. Новосибирск: Наука, 2003. 318 с.

3. Проскуряков Ю.Г. и др. Дорнование отверстий тонкостенных деталей в обоймах / Акименко Ю.А., Суханов Э.С. и др. // Вестник машиностроения. 1971. №12. С. 37 – 41.

4. Акименко Ю.А. Исследование процесса дорнования отверстий тонкостенных деталей в обойме. Автореф. канд. дисс., Брянск, 1975. 21 с.

5. Исаев А.Н. Совершенствование процессов дорнования отверстий трубчатых заготовок: Дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 Ростов н/Д, 2005 399 с.

6. Метод конечных элементов в технике: под редакцией Б.Е. Победри. М.: Мир, 1975. 541 с.

7. Иосилевич Г.Б., Осипова Г.В. Решение конструкционно-контактных задач численными методами. М.: Машиноведение. 1976. №4. С. 69-73.

8. Тарабасов Н.Д. Расчет напряженных посадок в машиностроении. М.: Машиностроение, 1977. 268 с.

9. Головин Г.Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке с токами высокой частоты. Л.: Машиностроение, 1973. 144 с.

10. Атопов В.И., Сердобинцев Ю.П., Славин О.К. Моделирование контактных напряжений. М.: Машиностроение, 1988 272 с.
11. Зайдес С.А., Кропоткина Е.Ю., Лебедев А.Р. Моделирование процессов поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Издательство ИрГТУ, 2004. 309 с.
12. Морозов А.В. Расчет усилий при объемном электромеханическом дорновании тонкостенных втулок в замкнутом объеме / А.В. Морозов, Н.И. Шамуков // Научное обозрение. 2012. № 3. С. 136-141.

Морозов Александр Викторович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, alvi.mor@mail.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина,

Еремеев Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, erem.an@mail.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина,

Иванова Юлия Сергеевна. канд. техн. наук, доцент, yyulianius@gmail.ru, Россия, Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет),

Карпенко Михаил Александрович, канд. техн. наук, доцент, mikhailcarpenko@yandex.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина,

Каняева Ольга Михайловна, канд. техн. наук, доцент, kaniaeva@mail.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина

MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE IN CASE OF NON-FREE VOLUMETRIC ELECTROMECHANICAL MANDREL OF THIN-WALLED STEEL BUSHINGS

A.V. Morozov, A.N. Eremeev, Y.S. Ivanova, M.A. Karpenko, O.M. Kanyaeva

The article presents data on the effect of tension during volumetric electromechanical mandrel on the magnitude of residual stresses on the outer surfaces of thin-walled steel bushings obtained as a result of modeling. A simulation of the stress-strain state during volumetric electromechanical mandrel of thin-walled steel bushings installed in steel clips has been carried out. It is determined that an increase in tension during volumetric electromechanical mandreling of thin-walled steel bushings leads to an increase in residual stresses on their outer surface, as a result of which the total contact area increases. It is also observed that the axial forces during volumetric electromechanical mandrel are evenly distributed.

Key words: thin-walled steel bushings, volumetric electromechanical mandrel, stress-strain state, tension, residual stresses, modeling.

Morozov Alexander Viktorovich, doctor of technical sciences, docent, head of chair, alvi.mor@mail.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk state agrarian University. P. A. Stolypin,

Eremeev Anatoly Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, erem.an@mail.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk state agrarian University. P. A. Stolypin,

Ivanova Yuliya Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, yyulianius@gmail.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University (National Research University),

Karpenko Mikhail Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, mikhailcarpenko@yandex.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk state agrarian University. P. A. Stolypin,

Kanyaeva Olga Mikhailovna, candidate of technical sciences, docent, kaniaeva@mail.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk state agrarian University. P. A. Stolypin

УДК 621.923.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-436-437

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МНОГОБРУСКОВОМ РОТОРНОМ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ

А.В. Королев, А.А. Перегородов, А.А. Королев, П.Н. Резанов

В работе рассматривается математическое моделирование режущей способности абразивного инструмента при многобрусковом роторном суперфинишировании. Показана особенность роторного суперфиниширования, которая заключается в том, что абразивный инструмент в виде нескольких равномерно расположенных вокруг обрабатываемой поверхности абразивных брусков вращают вокруг оси, расположенной под углом к оси вращения заготовки, а ось вращения брусков дополнительно вращают вокруг оси вращения заготовки. При этом, рабочая поверхность абразивных брусков приобретает выпуклую форму. Это обеспечивает возможность периодической очистки рабочей поверхности брусков от стружки и шлама, что повышает режущую способность абразивного инструмента. Установлена зависимость степени засаливания рабочей поверхности абразивных брусков стружкой и шламом на различных участках их рабочей поверхности в зависимости от режима многобрускового роторного суперфинишировния наружной цилиндрической поверхности. Результаты работы могут найти применение при окончательной обработке внутренних колец роликовых подшипников, а также могут быть адаптированы к суперфинишной обработке различных по форме и размерам рабочих поверхностей деталей.

Ключевые слова: кольца подшипников, многобрусковое суперфинишировние,, абразивный инструмент, ось вращения.

Введение. Одним из широко применяемых методов окончательной обработки высокоточных поверхностей деталей машиностроения, обеспечивающих низкий уровень шероховатости и волнистости обработанной поверхности и высокое качество поверхностного слоя, является процесс супефинишировния. Проблемой широко применяемого традиционного процесса суперфинишировния является то, что рабочая поверхность абразивного инструмента быстро заполняется стружкой и шламом и теряет режущую способность. Поэтому на практике приходится суперфинишную обработку осуществлять в несколько технологических переходов различными по зернистости абразивными брусками, что снижает производительность обработки и повышает сложность технологического оборудования. Для устранения указанного недостатка применяют пористый абразивный инструмент и инструмент из сверхтвердых материалов [1-4], используют высокоэффективные технологические жидкости [5-7], на режущий инструмент накладывают ультразвуковые колебания [8], абразивному инструменту сообщают дополнительные движения [9-12], оптимизируют условия обработки [13-20]. Все эти способы повышают эффективность процесса суперфинишировния, но обычно приводят к повышению сложности технологического оборудования и необходимости высококвалифицированной наладки оборудования. Наиболее простым и эффективным способом повышения производительности процесса суперфинишировния является использование способа многобрускового суперфинишировния [21-23]. Однако отсутствие достаточно полного понимания и моделирования этого сложного процесса сдерживает его практическое применение.

Цель статьи**.** В статье приводится математическое моделирование режущей способности абразивного инструмента при многобрусковом роторном суперфинишировании.

Изложение основного материала. Проблему очистки рабочей поверхности абразивного инструмента от стружки и шлама и поддержания его высокой режущей способности решает способ суперфинишировния [23], схема которого изображена на рис. 1.

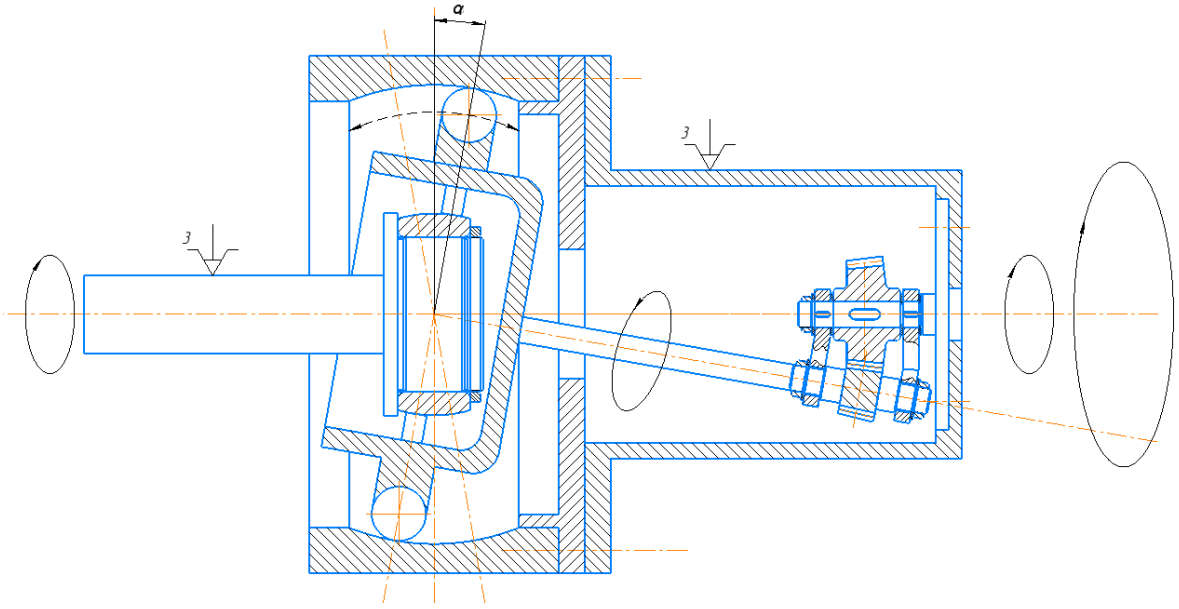


Рис. 1. Схема обработки кольца роликового подшипника способом многобрускового роторного суперфинишировния.

Сущность способа состоит в том, что в качестве абразивного инструмента используют несколько абразивных брусков, которые располагают вокруг обрабатываемой поверхности заготовки, представляющей собой, например, кольцо роликоподшипника, поджимают их к обрабатываемой поверхности с постоянной силой и придают им с помощью специальной суперфинишной головки вращение вокруг оси, совершающей планетарное вращательное движение под углом к оси вращения заготовки. Для формирования заданного профиля обрабатываемой поверхности брускам дополнительно могут придавать движение вдоль оси заготовки по заданной траектории с помощью специального копировального устройства.

При осуществлении данного способа абразивные бруски при движении вдоль обрабатываемой поверхности поворачиваются в разные стороны под углом к этой поверхности, в результате чего рабочая поверхность абразивных брусков приобретает выпуклую форму. Это создает возможность рабочей поверхности абразивного инструмента очищаться от стружки и шлама, что обеспечивает ей высокую режущую способность. На рис. 2 изображена расчетная схема этой обработки.

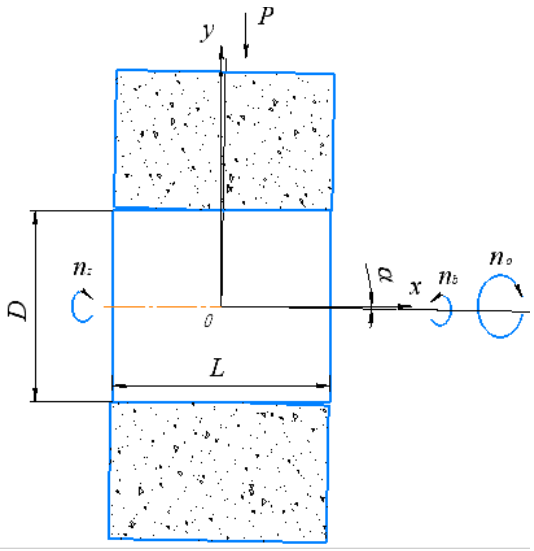


Рис. 2. Схема для расчета времени контакта абразивного инструмента с заготовкой

Заготовка диаметром D и длиной L вращается вокруг оси $0x$ с частотой n_z. Абразивные бруски поджимают к обрабатываемой поверхности с силой P и вращают с частотой n_b вокруг оси, расположенной под углом α к сои вращения заготовки $0x$. Дополнительно оси вращения брусков придают планетарное вращение вокруг оси вращения заготовки $0x$с частотой n_o. В процессе вращения брусков они устанавливаются под различным углом к образующей поверхности заготовки. В центральной части заготовки абразивные бруски расположены по нормали к обрабатываемой поверхности. В крайних положениях абразивные бруски находятся относительно обрабатываемой поверхности под углом α. В процессе своего вращения абразивные бруски скользят вдоль обрабатываемой поверхности и удаляют шероховаты верхний слой. При этом абразивные бруски самозатачиваются, их рабочая поверхность приобретает выпуклую форму и контактирует с обрабатываемой поверхностью различными своими участками. Это обеспечивает возможность периодической очистки рабочей поверхности абразивных брусков от стружки и шлама, что обеспечивает их высокую режущую способность.

Форму профиля абразивных брусков, которую они получают в процессе самозатачивания, можно описать дугой окружности с радиусом:

$$r = \frac{1}{2}(L/tg\alpha - D), \tag{1}$$

где r - радиус выпуклости рабочей поверхности абразивного бруска, м; α - угол наклона оси вращения абразивного инструмента относительно оси вращения заготовки, рад; D – диаметр обрабатываемой поверхности, м; L - длина обрабатываемой поверхности, м.

Несложно показать, что перемещение абразивного инструмента вдоль оси заготовки осуществляется по синусоидальному закону:

$$y = (0.5D + r) \cdot sin\,\alpha \cdot sin\,\beta, \tag{2}$$

где β - угол поворота абразивного инструмента относительно плоскости расположения оси заготовки и оси вращения абразивного инструмента, рад.

Из равенств (1) и (2) следует, что ширина продольного профиля абразивных брусков определяются равенствами:

$$H = 2 \cdot r \cdot sin\,\alpha = (L/tg\alpha - D)\,sin\,\alpha, \tag{3}$$

где H - ширина абразивных брусков, м.

Тангенс текущего угла поворота бруска относительно нормали к обрабатываемой поверхности:

$$tg\alpha_T = \frac{y}{0.5D+r} = sin\,\alpha \cdot sin\,\beta, \tag{4}$$

где α_T - текущий угол поворота бруска относительно нормали к обрабатываемой поверхности, рад.

В качестве исходных данных при моделировании процесса суперфиниширования примем следующие зависимости [24]:

$$S_i(a_i) = 2{,}5 \cdot a_i^2; \tag{5}$$

$$z_a(a_i, a_m) = 0{,}24 z_0 \left(\frac{(a_m - a_i)}{d_0}\right)^{2{,}75}; \tag{6}$$

$$z_0 = \frac{1{,}55}{d_0^2} V_K^{2/3} = \frac{ж_s}{d_0^2}, \quad (7)$$

где a_i - глубина царапины на поверхности заготовки от i-ого абразивного зерна, м; a_m - максимально возможная глубина царапины на площадке контакта, м; $S_i(a_i)$ - площадь поперечного сечения i-ой царапины, м^2; d_0 - средний диаметр абразивных зерен инструмента, м; z_0 - число зерен на единице рабочей поверхности абразивного инструмента, шт/м^2; $z_a(a_i, a_m)$ - число царапин глубинойa_i на единице поверхности контакта инструмента и заготовки; $V_з$ - доля зерен в единице объема абразивного инструмента; K_c - коэффициент структуры абразивного инструмента (табл. 1).

Коэффициент структуры абразивного инструмента

Номер структуры	4	5	6	7	8
$V_{з,\%}$	54	52	50	48	46
K_c	1,02	1,00	0,97	0,94	0,92

В процессе обработки между абразивным инструментом и заготовкой возникает нормальная сила Р. Эта сила уравновешивается силой резания $P_р$ и силой давления набившихся в поры бруска стружки и шлама P_s . В соответствии с работой [24] соотношение между силой резания P_0 и силой, вызванной давлением на обрабатываемую поверхность набившегося в порах инструмента шлама $P_{щ}$ пропорционально отношению объема, занимаемой на рабочей поверхности инструмента шламом, к объему оставшегося свободного пространства между зернами:

$$\frac{P_s}{P_p} = \frac{\vartheta_s}{\vartheta - \vartheta_s}, \text{ при } \vartheta_s \le \vartheta, \quad (8)$$

где ϑ - объем пространства между абразивными зернами, *м*^{3}; ϑ_s- объем срезанной при обработке стружки, *м*^{3}; P_p- сила резания, Н; P_s- сила воздействия на обрабатываемую поверхность стружки и шлама.

В таком случае (8) силу резания можно выразить через силу прижима абразивного инструмента к обрабатываемой поверхности заготовки следующим образом:

$$P_p = P \ \frac{1}{K_s}, \quad (9)$$

Обозначим:

$$K_s = \frac{\vartheta}{\vartheta - \vartheta_s} \text{ при } \vartheta_s \le \vartheta. \quad (10)$$

Для бруска, у которого в порах забилось незначительное количество стружки, $\vartheta_{щ}$=0, а коэффициент засаливания бруска $K_{Ш}$=1. При полном заполнении пор стружкой $\vartheta_{щ} = \vartheta$, а $K_{Ш} \to \infty$.

Из работы [24] объем пространства между зернами равен:

$$\vartheta = F_b d_o K_\vartheta, \quad (11)$$

где F_b- площадь контакта абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, *м*^{2};

$$K_\vartheta = 1/K_c - 0.5K_c$$

Определим объем срезаемой стружки. Элементарный объем срезаемой стружки на единице поверхности контакта абразивного инструмента и заготовки равен:

$$dV(a_i, a_m, t) = k_p \cdot S_i(a_i) \cdot z_a(a_i, a_m) \cdot v dF dt, \quad (12)$$

где k_p- относительная опорная площадь обрабатываемой поверхности; v - относительная скорость перемещения инструмента и обрабатываемой поверхности, м/с; F - площадь контакта инструмента и заготовки, *м*^{2}; t - время непрерывного контакта элементарного участка рабочей поверхности инструмента и заготовки, с; z_r- число режущих абразивных зерен на единице рабочей поверхности инструмента, шт/*м*^{2}.

Величина k_p учитывает состояние микрорельефа обрабатываемой поверхности. На первом этапе обработки исходная высота микронеровностей обрабатываемой поверхности высокая, поэтому фактическая площадь контакта абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности низкая. При этом абразивные зерна врезаются в поверхность на большую глубину и удаляют большой слой шероховатой поверхности заготовки. Со временем наиболее выступающие вершины микронеровностей поверхности заготовки срезаются, и фактическая площадь контакта абразивного инструмента и заготовки увеличивается. Это приводит к уменьшению глубины срезов, и увеличению их числа, что способствует снижению шероховатости поверхности при обработке. Одновременно возрастает засаливание абразивного инструмента и снижается скорость удаления исходного шероховатого слоя заготовки.

Если линия контакта абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности линейная, то величину a_m можно принять постоянной для всех точек контакта. Если площадка контакта является криволинейной, то величина a_mна различных участках площадки контакта является различной. Если площадка контакта имеет вдоль образующей поверхности заготовки форму параболы, а в поперечном сечении располагается вдоль окружности поверхности заготовки, то после интегрирования равенства (12) по площадке контакта, получим:

$$V(t) = 2k_p \cdot v \cdot dt \cdot \frac{b}{a_m} \cdot \int_0^{\sqrt{2a_m \cdot r}} \int_0^{a_m - y^2/2r} S_i(a_i) \cdot z_a(a_i, a_m) \cdot da \ _i dy, \quad (13)$$

где r - радиус кривизны параболы в центре площадки контакта, м.

Подставляя в (13) значения $S_i(a_i)$ и $z_a(a_i, a_m)$ из (5) и (6), определим:

$$V(t) = 1{,}2 \frac{k_p \cdot z_o}{d_o^{2,75} \cdot a_m} v \cdot dt \cdot b \cdot \int_0^{\sqrt{2a_m \cdot r}} \int_0^{a_m - y^2/2r} a_i^2 \cdot (a_m - a_i)^{2,75} \cdot da \ _i dy, \quad (14)$$

Обозначим: $a_i = x \cdot a_m; y = u\sqrt{2r \cdot a_m}$.

Откуда: $da = a_m dx; dy = du\sqrt{2r \cdot a_m}$.

Тогда равенство (15) примет вид:

$$V(t) = 1{,}7k_p \frac{z_o \cdot a_m^{5,25} \cdot \sqrt{r}}{d_o^{2,75}} v \cdot dt \cdot b \cdot \int_0^1 \int_0^{1-u^2} x^2 \cdot (1-x)^{2,75} \cdot dx du. \quad (15)$$

Интегральное выражение (15) в натуральных функциях не выражается. Но оно вычисляется приближенными методами и равно 0,014. Тогда выражение (15) запишется следующим образом:

$$V(t) = 0{,}024 k_p \frac{z_o \cdot a_m^{5{,}25} \cdot \sqrt{r}}{d_o^{2{,}75}} v \cdot dt \cdot b.. \quad (16)$$

Как видно из равенства (16), наиболее сильное влияние на съем металла оказывает глубина взаимодействия абразивного инструмента и заготовки a_m. В свою очередь эта величина зависит от силы прижима абразивного инструмента к поверхности заготовки.

В работе [24] показано, что нормальная сила резания единичным зерном равна:

$$P_i = 51 \tau_{сдв} \cdot a_i^2 (1 + \xi). \quad (17)$$

где ξ — коэффициент усадки стружки; $\tau_{сдв}$ — величина касательных напряжений сдвига обрабатываемого материала.

На основе равенства (17) определим элементарную силу резания:

$$dP_r = 51 \frac{\tau_{сдв}}{} \cdot (1 + \xi) \cdot a_i^2 \cdot z_a(a_m, a_i) \cdot dF.. \quad (18)$$

Выполнив процедуру интегрирования равенства (18) по площадке контакта и раскрывая значение $z_a(a_m, a_i)$ (6), получим значение силы прижима абразивного инструмента к заготовке:

$$P_r = 24{,}48 \cdot k_p \frac{\tau_{сдв} \cdot a_m^{1{,}75}}{d_0^{2{,}75}} \cdot (1 + \xi) \cdot b \cdot z_o \int_0^{\sqrt{2a_m \cdot r}} \int_0^{a_m - \frac{y^2}{2r}} a_i^2 \cdot \left(1 - \frac{a_i}{a_m}\right)^{2{,}75} da_i dy. \quad (19)$$

Аналогично равенству (14) после интегрирования выражения (19) получим:

$$P_r = 0{,}48 k_p \frac{\tau_{сдв} \cdot a_m^{5{,}25} \sqrt{r}}{d_0^{2{,}75}} \cdot (1 + \xi) \cdot b \cdot z_o. \quad (20)$$

Подставляя полученное выражение (20) в равенство (16), определим объем срезанной стружки в зависимости от силы резания обрабатываемой поверхности абразивным инструментом:

$$V(t) = 0{,}05 P_r v \cdot dt / \left((1 - \xi) \cdot \tau_{сдв}\right). \quad (21)$$

Как видно из (21), объем мгновенно срезанной стружки не зависит от формы контакта абразивного бруска с заготовкой, ни от глубины взаимодействия, ни от зернистости инструмента, но зависит от силы прижима абразивного бруска к обрабатываемой поверхности, скорости резания и механических свойств материала заготовки. Относительная скорость перемещения инструмента и обрабатываемой поверхности vскладывается из двух составляющих – окружной скорости вдоль окружности заготовки и поперечной скорости вдоль образующей заготовки. Окружная скорость складывается из скорости вращения заготовки с частотой n_z и скорости планетарного вращения оси вращения абразивного инструмента вокруг оси вращения заготовки с частотой n_o. Поперечная скорость вдоль образующей заготовки зависит от частоты вращения абразивного инструмента n_b. Тогда результирующая скорость равна:

$$v(t) = \sqrt{\left(\pi \cdot D \cdot (n_z \pm n_o)\right)^2 + dy/dt}. \quad (22)$$

Знак плюс в равенстве (22) соответствует встречному планетарному вращению брусков и заготовки, а знак минус – попутному. Так как значение у определяется равенством (2), а величина $\beta = 2\pi \cdot n_b \cdot t$, то выражение (22) можно представить в виде:

$$v(t) = \sqrt{\left(\pi \cdot D \cdot (n_z + n_o)\right)^2 + (2\pi \cdot n_b (0.5D + r) \cdot \sin\alpha \cdot cos(2\pi \cdot n_b \cdot t))^2}. \quad (23)$$

Подставляя выражение (23) в равенство (21) и производя интегрирование, получим:

$$V(\varphi) = \frac{0{,}05 P_r}{\left((1-\xi) \cdot \tau_{сдв}\right)} \cdot \int_{t_{n(\varphi)}}^{t_k(\varphi)} v(t) \cdot dt\,, \quad (24)$$

где t_n и t_k - соответственно время начала и конца контакта данного участка рабочей поверхности абразивного бруска с обрабатываемой поверхностью, с.

Определим t_n и t_k. Пусть абразивный брусок занимает положение по центру профиля обрабатываемой поверхности. В этом положении его плоскость симметрии совпадает с нормалью к этой поверхности - $\alpha_T = 0$. Рассмотрим перемещение произвольной точки на профиле рабочей поверхности абразивного бруска, находящейся\ под углом $\varphi \le \alpha$ к плоскости симметрии абразивного бруска. Эта точка вступит в контакт с обрабатываемой поверхностью при $\alpha_{Tn} = \varphi - arcsin\sqrt{2a_m/r}$.

Данная точка может выйти из контакта с обрабатываемой поверхностью при угле поворота бруска $\alpha_{Tk} = \alpha_{Tn} + 2\,arcsin\left(\sqrt{\frac{2a_m}{r}}\right)$ при $\alpha_{Tk} \le \alpha$.

Поэтому, используя равенство (4), определим:

$$t_n(\varphi) = \frac{1}{2\pi n_b} arcsin\left(\frac{tg(\varphi - arcsin(\sqrt{2a_m/r}))}{\sin\alpha}\right) \text{ при } \varphi \le \alpha; \quad (25)$$

$$t_k(\varphi) = \frac{1}{2\pi n_b} arcsin\left(\frac{tg(\varphi + arcsin(\sqrt{2a_m \cdot r}))}{\sin\alpha}\right)$$

$$\text{при } \left(\frac{tg(\varphi + arcsin(\sqrt{2a_m \cdot r}))}{\sin\alpha}\right) \le \alpha;$$

$$t_k(\varphi) = \frac{2}{2\pi n_b} arcsin\left(\frac{tg\left(\alpha - arcsin\left(\sqrt{2a_m \cdot r}\right)\right)}{\sin\alpha}\right)$$

$$\text{при } tg\left(\varphi + arcsin\left(\sqrt{2a_m \cdot r}\right)\right) > \alpha.$$

Величину a_m определим из равенства (20):

$$a_m = 1{,}15 \left(\frac{P_r \cdot d_o^{2{,}75}}{\tau_{сдв} \cdot a_m^{5{,}25} \sqrt{r} \cdot k_p \cdot (1+\xi) \cdot b \cdot z_o}\right)^{\frac{1}{5{,}25}}. \quad (26)$$

Подставляя найденные значения a_m (26) и пределов интегрирования (25) в выражение (24) определим объем непрерывно срезанной стружки участком рабочей поверхности инструмента, длина профиля которого равна:

$$h_b = 2\sqrt{2a_m \cdot r} \text{ при } \varphi \le arcsin\sqrt{\frac{2a_m}{r}}; \quad (27)$$

$$h_b = \sqrt{2a_m \cdot r} + r \cdot sin(\alpha - \varphi) \text{ при } \varphi > arcsin\sqrt{\frac{2a_m}{r}}.$$

Используя равенства (9)-(11), определим объем свободного пространства между абразивными зернами на различных участках рабочей поверхности абразивного бруска:

$$\vartheta = \square_b \cdot b \cdot d_o K_\vartheta, \quad (28)$$

Если сравнить объем срезанной стружки каким-то участком рабочей поверхности абразивного бруска при непрерывном его контакте с обрабатываемой поверхностью с объемом пространства между зернами на этом участке, то можно оценить режущую способность абразивного инструмента. Если $V(\varphi) \le \vartheta(\varphi)$, то данный участок рабочей поверхности абразивного бруска обладает режущими свойствами, а объем удаленного этим участком металла равен величине $V(\varphi)$ (24). Если $V(\varphi) > \vartheta(\varphi)$, то свободное пространство между абразивными зернами рабочей поверхности бруска забито стружкой, режущая способность рабочей поверхности бруска нарушена, а объем удаленного этим участком металла равен величине $\vartheta(\varphi)$ (28).

Заключение. Исследования показали, что многобрусковое роторное суперфиниширование обеспечивает возможность периодической очистки рабочей поверхности абразивного инструмента от стружки и шлама, и тем самым возможность существенного повышения производительности процесса обработки. Установлены геометрические параметры рабочей поверхности абразивных брусков, определено время непрерывного контакта каждого участка рабочей поверхности абразивного бруска с обрабатываемой поверхностью, объем срезанной стружки на этом участке, установлен объем пространства между абразивными зернами на каждом из этих участков, в которых может размещаться срезанная стружка. Это обеспечивает возможность прогнозировать производительность удаления припуска и необходимого времени обработки.

Результаты исследования могут найти применение в промышленности на операциях процесса суперфиниширования колец роликовых подшпинков, а предложенная методика расчета режущей способности абразивного инструмента может использоваться при исследовании процесса многобрускового роторного суперфиниширования самых разнообразных поверхностей деталей.

Список литературы

1. Orap A.A., Kryl' Ya.A., Galkov A.V. Superfinishing carbide and nitride engineering ceramics. Сверхтвердые материалы. 1992. № 3. С. 54-57.

2. Банников А.И., Полянчиков Ю.И., Курченко А.И., Макарова О.А. Исследование влияния некоторых аспектов прессования на структуру инструмента без связки и эффективность суперфиниширования. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2007. № 3 (29). С. 11-13.

3. Емельяненко А.А. Исследование износостойкости новых абразивных брусков без связки при суперфинишировании. дис. канд. техн. наук. Волгоград, 1999.

4. Емельяненко А.А. Суперфиниширование однокомпонентным абразивным инструментом. Учеб. пособие : [Для студентов, обучающихся по специальности 120100 "Технология машиностроения"]. Волгоград, 2004.

5. Башкирцева И.В. Повышение эффективности суперфиниширования путем рационального применения смазочно-охлаждающей жидкости : специальность 05.03.01 : дис. канд. техн. наук. / Башкирцева Ирина Владимировна, 2009. 112 с.

6. Вадивасов П.В., Бочкарев П.Ю. Повышение эффективности суперфиниширования путем рационального применения смазочно-охлаждающей жидкости // Современные инновации в науке и технике. материалы 3-ой Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Горохов А.А., 2013. С. 32-34.

7. Шумячер В.М. Механо-химические процессы и эффективность смазочно-охлаждающих технологических сред при суперфинишировании, хонинговании и доводке. автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук // Волжский НИИ абразивов и шлифования. Саратов, 1997.

8. Кульков А.В. Абразивное суперфиниширование с применением ультразвука // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. № 12(72). С. 20-26.

9. Luk'yanov K.Y. More efficient superfinishing of conical surfaces. Russian Engineering Research. 2010. Т. 30. № 3. С. 294-295.

10. Лукьянов К.Ю. Повышение эффективности процесса суперфиниширования конических поверхностей прецизионных деталей : специальность 05.03.01 : дис. канд. техн. наук. / Лукьянов Константин Юрьевич. Самара, 2007. 247 с.

11. Лукьянов К.Ю. Повышение эффективности процесса суперфиниширования конических поверхностей прецизионных станков. СТИН. 2009. № 12. С. 15-17.

12. Luk'yanov K.Y. Superfinishing head with double tool oscillation. Russian Engineering Research. 2011. Т. 31. № 11. С. 1139-1140.

13. Neagu-Ventzel S., Cioc S., Marinescu I. A wear model and simulation of superfinishing process: analysis for the superfin-ishing of bearing rings. Wear. 2006. Т. 260. № 9-10. С. 1061-1069.

14. Балтаев Т.А. Современные технологии окончательной обработки дорожек качения подшипников / Т. А. Балтаев, Г. М. Жазыкбаева, Х. Т. Тур-лыбаев // Технический сервис машин. 2022. № 4(149). С. 127-135. DOI 10.22314/2618-8287-2022-60-4-127-135. EDN GNDJVX..

15. Zakharov O.V., Datskovskaya E.A. Setup of centerless superfinishing machine tools. Russian Engineering Research. 2010. Т. 30. № 12. С. 1263-1267.

16. Рахчеев В.Г., Лукьянов К.Ю., Журавлев А.Н. Повышение эффективности суперфиниширования фасонных поверхностей прецизионных деталей. Тяжелое машиностроение. 2006. № 1. С. 42-43.

17. Бржозовский Б.М., Захаров О.В., Балаев А.Ф. Кинематические и силовые аспекты бесцентрового суперфиниширования. СТИН. 2006. № 11. С. 2-5.

18. Бржозовский Б.М., Захаров О.В. Повышение точности суперфиниширования на основе статистического моделирования. СТИН. 2010. № 9. С. 25-30.

19. Тюрин А. Суперфинишировние: баланс энергии взаимодействия инструмента и заготовки. Автомобильная промышленность. 2008. № 7. С. 28-30.

20. Тюрин А.Н. Энергетические параметры процесса суперфинишировния. Труды университета. 2008. № 3 (32). С. 11-14.

21. Салимов Б.Н. Повышение эффективности изготовления колец шарикоподшипников с многоточечным контактом на основе со-вершенствования операции суперфинишировния: дис. канд. техн. наук. Саратов. 2013. 126 с.

22..Королев А.В., Чистяков А.М., Давиденко О.Ю. Новые прогрессивные технологии машиностроительного производства. Часть 3. Технология многобрускового формообразующего суперфинишировния с локализацией контакта инструмента и обрабатываемой поверхности. - Саратов: СГТУ, 1997.- 152 с.

23. Патент на изобретение № 2821982. Способ чистовой обработки колец подшипников/ Давиденко О.Ю., Перегородов А.А.. Патентообладатель СГТУ имени Гагарина Ю.А.

24. Королев А.В. Комбинированный способ шлифования-доводки качающимся кругом / А. В. Королев, С. И. Капульник, Д. Г. Евсеев; Под ред. А. В. Королева. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983 (вып. дан. 1984). 96 с.

Королев Альберт Викторович, д-р техн. наук, профессор, science7@bk.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Перегородов Алексей Аркадьевич, аспирант, peregorodov98@mail.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Королев Андрей Альбертович, д-р техн. наук, профессор, kor_science@mail.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Резанов Павел Николаевич, аспирант, rezanov.1998@mail.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

MODELING THE CUTTING ABILITY OF AN ABRASIVE A MULTI - LINE TOOL ROTARY SUPERFINISHING

A.V. Korolev, A.A. Peregorodov, A.A. Korolev, P.N. Rezanov

The paper considers the mathematical modeling of the cutting ability of an abrasive tool in multi-bar rotary superfinishing. A feature of rotary superfining is shown, which consists in the fact that an abrasive tool in the form of several abrasive bars evenly arranged around the surface to be processed is rotated around an axis located at an angle to the axis of rotation of the workpiece, and the axis of rotation of the bars is additionally rotated around the axis of rotation of the workpiece. At the same time, the working surface of the abrasive bars acquires a convex shape. This provides the possibility of periodic cleaning of the working surface of the bars from chips and sludge, which increases the cutting ability of the abrasive tool. The dependence of the degree of salting of the working surface of abrasive bars with chips and sludge on various parts of their working surface, depending on the mode of rotary superfinishing of the outer cylindrical surface, has been established.

Key words: bearing rings, multi-bar superfining, , abrasive tool, axis of rotation.

Korolev Albert Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, science7@bk.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University,

Peregorodov Alexey Arkadievich, postgraduate, peregorodov98@mail.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

Korolev Andrey Albertovich, doctor of technical sciences, professor, kor_science@mail.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University,

Rezanov Pavel Nikolaevich, postgraduate, rezanov.1998@mail.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

УДК 539.3:534.26
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-441-442

РАССЕЯНИЕ ПЛОСКОЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ НЕОДНОРОДНЫМ СФЕРОИДОМ С ЖЕСТКИМ ШАРОВЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

Л.А. Толоконников, Д.В. Окороков

Получено аналитическое решение задачи о рассеянии плоской гармонической звуковой волны жидким неоднородным сфероидом с жестким шаровым включением. Исследована дальняя зона рассеянного акустического поля.

Ключевые слова: рассеяние, звуковые волны, неоднородный сфероид, идеальная жидкость.

Сфероидальной геометрией охватывается большое разнообразие форм. В предельных случаях вытянутые и сплюснутые сфероиды превращаются в сферу, диск, иглу. Рассеяние звуковых волн на неоднородных телах сфероидальной формы рассматривалось в ряде работ. В работах [1 – 3] решены задачи дифракции звуковых волн на

непрерывно-неоднородных жидких сфероидах, а в [4, 5] – на непрерывно-неоднородных упругих сфероидах. Дифракция плоской звуковой волны на упругом сфероиде с неоднородным упругим покрытием в присутствии подстилающей поверхности рассмотрена в [6].

В настоящей работе находится решение задачи о рассеянии плоской гармонической звуковой волны неоднородным проницаемым сфероидом (жидким или из материала, подобного жидкости, в котором не распространяются сдвиговые волны) с жестким шаровым включением.

Постановка задачи. Рассмотрим непрерывно-неоднородный сфероид с полуосью a и второй полуосью b. Введем прямоугольную декартову систему координат x, y, z с началом в центре сфероида. Полагаем, что осью вращения сфероида является ось z. Свяжем с координатами x, y, z сферические координаты r, θ, φ. Материал сфероида характеризуется переменными плотностью ρ и скоростью звука c, которые являются непрерывными функциями радиальной координаты r: $\rho = \rho(r)$, $c(r)$. В центре сфероида находится абсолютно жесткий шар радиуса r_0. Тело помещено в однородную идеальную сжимаемую жидкость с плотностью ρ_1 и скоростью звука c_1. Из внешнего пространства на сфероид падает произвольным образом плоская гармоническая звуковая волна давления p_0 (рис. 1), которая в сферической системе координат запишется в виде

$$p_0 = A_0 \exp\{ik_1 r[\cos\theta\cos\theta_0 + \sin\theta\sin\theta_0\cos(\varphi - \varphi_0)] - i\omega t)\}, \tag{1}$$

где A_0 – амплитуда волны; ω – круговая частота; $k_1 = \omega/c_1$ – волновое число в окружающей жидкости; θ_0 и φ_0 – полярный и азимутальный углы падения волны; t – время. В дальнейшем временной множитель $e^{-i\omega t}$ будем опускать.

Определим акустические поля вне и внутри сфероида.

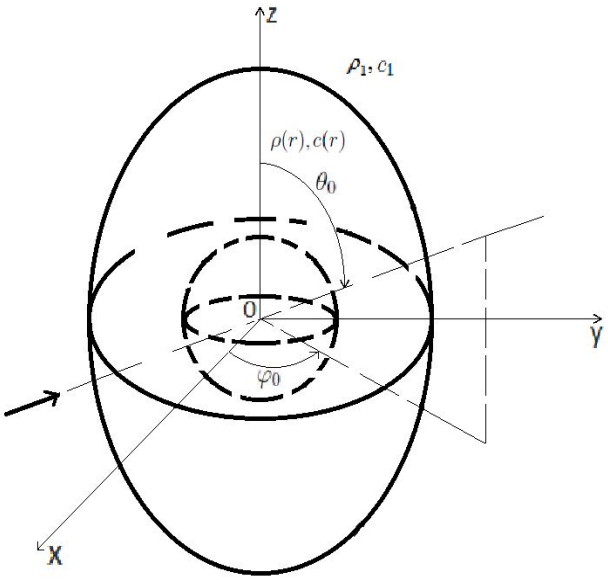


Рис. 1. Геометрия задачи

Математическая модель задачи. Распространение малых возмущений в однородной идеальной жидкости в случае гармонических колебаний описывается уравнением Гельмгольца [7]

$$\Delta p_1 + k_1^2 p_1 = 0, \tag{2}$$

где $p_1 = p_0 + p_s$ – давление полного акустического поля; p_s – звуковое давление в рассеянной волне.

Распространение звука в неоднородной идеальной жидкости описывается уравнением [8, 9]

$$\Delta p + k^2 p - \frac{1}{\rho}\operatorname{grad}\rho\ \operatorname{grad} p = 0, \tag{3}$$

где p – звуковое давление в неоднородной среде; $k = \omega/c$ – волновое число в неоднородной жидкости.

Скорости частиц в однородной и неоднородной жидкостях определяются соответственно по формулам

$$\mathbf{v}_1 = \frac{1}{i\rho_1\omega}\operatorname{grad} p_1, \qquad \mathbf{v} = \frac{1}{i\rho\omega}\operatorname{grad} p. \tag{4}$$

Граничные условия на поверхности сфероида S заключаются в равенстве нормальных скоростей частиц внешней среды и неоднородной жидкости и равенстве акустических давлений

$$v_{1n}|_S = v_n|_S, \qquad p_1|_S = p|_S. \tag{5}$$

Граничное условие на поверхности жесткого шарового включения заключается в равенстве нулю нормальной скорости частиц прилегающей неоднородной жидкости

$$v_n|_{r=a} = 0. \tag{6}$$

Кроме того, для давления в рассеянной волне p_s должно выполняться условие излучения на бесконечности [7].

Таким образом, в математической постановке задача заключается в нахождении решений дифференциальных уравнений (2) и (3), удовлетворяющих граничным условиям (5) и (6), а также условию излучения на бесконечности.

Аналитическое решение задачи. Рассмотрим поставленную задачу для случая, когда квадрат эксцентриситета сфероида является малой величиной. Найдем решение задачи методом возмущений, выбирая в качестве малого параметра величину e, определяемую формулами

$$e = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon^2 - 1}, \quad \varepsilon = \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)^{1/2},$$

$$e = \varepsilon^2, \quad \varepsilon = \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^{1/2}$$

для вытянутого $(a > b)$ и сплюснутого $(a < b)$ сфероидов соответственно, где ε – эксцентриситет сфероида.

Уравнение поверхности сфероида S в сферической системе координат имеет вид

$$r(\theta) = a(1 - e\sin^2\theta)^{-1/2}.$$

Давление падающей плоской волны представим в виде [10]

$$p_0(r,\theta) = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n} i^n (2 - \delta_{0m}) N_{mn}^{-1} j_n(k_1 r) P_n^m(\cos\theta_0)\cos m(\varphi - \varphi_0), \tag{7}$$

где $P_n^m(x)$ – присоединенный многочлен Лежандра степени n порядка m; $j_n(x)$ – сферическая функция Бесселя порядка n; $N_{mn} = \frac{2}{(2n+1)}\frac{(n+m)!}{(n-m)!}$ – квадрат нормы присоединенных многочленов Лежандра; δ_{0m} – символ Кронекера.

Искомые функции p_s и p представим в виде разложений по малому параметру e

$$p_s(r,\theta,\ldots\varphi) = p_s^0(r,\theta,\ldots\varphi) + e\, p_s^1(r,\theta,\varphi) + \ldots, \tag{8}$$

$$p(r,\theta,\ldots\varphi) = p^0(r,\theta,\ldots\varphi) + e\, p^1(r,\theta,\varphi) + \ldots, \tag{9}$$

ограничиваясь членами со степенями e не выше первой.

Подставим разложения (8) и (9) в уравнения (2) и (3) и приравняем нулю члены с одинаковыми степенями e. В результате для определения функций p_s^j и p^j $(j = 0,1)$ получим уравнения, которые в сферической системе координат имеют вид

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial p_s^j}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial p_s^j}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2 p_s^j}{\partial\varphi^2} + k_1^2 p_s^j = 0, \tag{10}$$

$$\frac{\partial^2 p^j}{\partial r^2} + \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{\rho(r)}\frac{d\rho}{dr}\right)\frac{\partial p^j}{\partial r} + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial p^j}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2 p^j}{\partial\varphi^2} + k^2(r)p^j = 0, \tag{11}$$

где $j = 0,1$.

Так как акустические поля во внешней среде и в неоднородной части сфероидального тела будет симметричны относительно плоскости $(\varphi_0, \varphi_0 + \pi)$, то с учетом условий излучения на бесконечности функции p_s^j и p^j будем искать в виде

$$p_s^j = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n} A_{mn}^j h_n(k_1 r) P_n^m(\cos\theta)\cos m(\varphi - \varphi_0), \tag{12}$$

$$p^j = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n} R_n^j(r) P_n^m(\cos\theta)\cos m(\varphi - \varphi_0), \tag{13}$$

где $h_n(x)$ – сферическая функция Ганкеля первого рода порядка n.

Подставляя (13) в уравнение (11) и используя дифференциальное уравнение для присоединенных многочленов Лежандра [10]

$$\frac{1}{\sin\theta}\frac{d}{d\theta}\left(\sin\theta\frac{d}{d\theta}P_n^m(\cos\theta)\right) + \left[n(n+1) - \frac{m^2}{\sin^2\theta}\right]P_n^m(\cos\theta) = 0,$$

получим линейное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами относительно неизвестной функции $R_n^j(r)$ $(j = 0,1)$ для каждого n $(n = 0,1,2,\ldots)$

$$\frac{\partial^2 R_n^j}{\partial r^2} + g(r)\frac{\partial R_n^j}{\partial r} + q(r)R_n^j = 0. \tag{14}$$

где

$$g(r) = \frac{2}{r} - \frac{1}{\rho(r)}\frac{d\rho}{dr}, \quad q(r) = k^2(r) - \frac{n(n+1)}{r^2}.$$

Коэффициенты A_{mn}^{j} и функции R_n^j подлежат определению из граничных условий (5) и (6), которые с учетом (4) запишем в виде

$$(p_0 + p_s)\big|_{r=r(\theta)} = p\big|_{r=r(\theta)}, \tag{15}$$

$$\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial}{\partial n}(p_0 + p_s)\bigg|_{r=r(\theta)} = \frac{1}{\rho(r)}\frac{\partial p}{\partial n}\bigg|_{r=r(\theta)}, \tag{16}$$

$$\frac{\partial p}{\partial r}\bigg|_{r=r_0} = 0. \tag{17}$$

При этом $\frac{\partial}{\partial n} = \cos\gamma\frac{\partial}{\partial r} + \sin\gamma\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\theta}$, где γ – угол между радиус-вектором r и внешней нормалью n к поверхности тела, а $\cos\gamma$ определяется формулой

$$\cos\gamma = \left[1 + \left(\frac{e\sin\theta\cos\theta}{1 - e\sin^2\theta}\right)^2\right]^{-1/2}.$$

С выбранной степенью точности находим

$$\cos\gamma = 1 + O(e^2), \qquad \sin\gamma = -e\sin\theta\cos\theta + O(e^2).$$

Принимая во внимание соотношение $\frac{\partial}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial r} - e\sin\theta\cos\theta\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\theta}$, подставим разложения (8), (9) в граничные условия (15), (16) и приравняем члены с одинаковыми степенями e, стоящие в левой и правой частях каждого равенства. Непосредственно это выполнить невозможно, так как в каждое граничное условие параметр e будет входить как явно, так и неявно (присутствовать в $r(\theta)$). Поэтому необходимо предварительно разложить все функции, неявно содержащие e, в ряды Тейлора в окрестности $r = a$ с тем, чтобы получить их явную зависимость от e. Проделав указанные операции и сохранив только линейные относительно e члены, получим следующие условия при $r = a$:

$$(p_0 + p_s^0)\big|_{r=a} = p^0\big|_{r=a}, \tag{18}$$

$$\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial}{\partial r}(p_0 + p_s^0)\bigg|_{r=a} = \frac{1}{\rho(r)}\frac{\partial p^0}{\partial r}\bigg|_{r=a}, \tag{19}$$

$$p_s^1\big|_{r=a} = \left[p^1 + \frac{a}{2}\sin^2\theta\frac{\partial}{\partial r}(p^0 - p_0 - p_s^0)\right]_{r=a}, \tag{20}$$

$$\frac{\partial p_s^1}{\partial r}\bigg|_{r=a} = \left\{\frac{\rho_1}{\rho(a)}\frac{\partial p^1}{\partial r} + \frac{a}{2}\sin^2\theta\left[\frac{\rho_1}{\rho(a)}\left(\frac{\partial^2 p^0}{\partial r^2} - \frac{1}{\rho(a)}\frac{\partial\rho}{\partial r}\frac{\partial p^0}{\partial r}\right) - \right.\right.$$
$$\left.\left. - \frac{\partial^2}{\partial r^2}(p_0 + p_s^0)\right] + \frac{1}{a}\sin\theta\cos\theta\left[\frac{\partial}{\partial\theta}(p_0 + p_s^0) - \frac{\rho_1}{\rho(a)}\frac{\partial p^0}{\partial\theta}\right]\right\}_{r=a}. \tag{21}$$

Подстановка (9) в граничное условие (17) дает еще два условия

$$\frac{\partial p^0}{\partial r}\bigg|_{r=r_0} = 0, \qquad \frac{\partial p^1}{\partial r}\bigg|_{r=r_0} = 0. \tag{22}$$

Теперь из полученных условий найдем коэффициенты A_{mn}^{j} и краевые условия для дифференциального уравнения (14).

Коэффициент A_{mn}^{0} определим из условия (18), подставляя в него (7), (12) и (13) (при $j = 0, 1$). Получим

$$A_{mn}^{0} = \frac{R_n^0(a) - \gamma_{mn}\, j_n(k_1 a)}{h_n(k_1 a)}, \tag{23}$$

где $\gamma_{mn} = 2A_0 i^n(2 - \delta_{0m})N_{mn}^{-1}P_n^m(\cos\theta_0)$.

Из условия (20) найдем коэффициент A_{mn}^{1}. Для этого после подстановки (7), (12) и (13) в (20) умножим левые и правые части полученного уравнения на $\sin\theta\, P_l^m(\cos\theta)$ и проинтегрируем по θ от 0 до π.

Используя условия ортогональности для присоединенных многочленов Лежандра [10]

$$\int_0^{\pi}\sin\theta\, P_n^m(\cos\theta)P_l^m(\cos\theta)d\theta = \begin{cases} 0, & n \neq l; \\ N_{ml}, & n = l. \end{cases}$$

и выражение для вронскиана [10]

$$j_n(x)h_n'(x) - j_n'(x)h_n(x) = i/x^2 ,$$

получаем

$$A_{mn}^1 = \frac{R_n^1(a)}{h_n(k_1a)} + \frac{a}{2N_{mn}h_n(k_1a)} \times \sum_{l=m}^{\infty} \left[\frac{d}{d\,r} R_l^0(a) - \gamma_{mn}\, k_1 j_l'(k_1a) - A_{mn}^0 k_1 h_l'(k_1a) \right] \alpha_{\ln}^m , \tag{24}$$

где

$$\alpha_{\ln}^m = \int_0^{\pi} \sin^3\theta\, P_n^m(\cos\theta) P_l^m(\cos\theta) d\,\theta ,$$

а штрихи означают дифференцирование по аргументу.

Выражения (23) и (24) для коэффициентов A_{mn}^j ($j = 0, 1$) содержат значения функций $R_n^j(r)$ и их производных при $r = a$, которые подлежат определению.

Из оставшихся неиспользованными условий (19), (21), (22) получаем четыре краевых условия, которым должны удовлетворять решения дифференциальных уравнений (14) для $j = 0, 1$: два краевых условия для нахождения функции $R_n^0(r)$ и два условия для нахождения $R_n^1(r)$. Будем иметь

$$\frac{d}{d\,r} R_n^0(r)\Big|_{r=r_0} = 0 , \tag{25}$$

$$\frac{d}{d\,r} R_n^0(r) + a_n R_n^0(r)\Big|_{r=a} = b_n , \tag{26}$$

$$\frac{d}{d\,r} R_n^1(r)\Big|_{r=r_0} = 0 , \tag{27}$$

$$\frac{d}{d\,r} R_n^1(r) + a_n R_n^1(r)\Big|_{r=a} = c_n , \tag{28}$$

где

$$a_n = -\frac{\rho(a) k_1 h_n'(k_1a)}{\rho_1 h_n(k_1a)} , \quad b_n = -\frac{i\rho(a)\gamma_{mn}}{\rho_1 a^2 k_1 h_n'(k_1a)} ,$$

$$c_n = \frac{a\,\rho(a)}{2\rho_1 N_{mn}} \sum_{l=m}^{\infty} \left[\left(-\frac{\rho_1}{\rho(a)} \frac{d^2 R_l^0}{d\,r^2} + f_{nl}^1 \frac{dR_l^0}{d\,r} + f_{nl}^2 R_l^0 + f_{nl}^3 \gamma_{ml} \right)_{r=a} \alpha_{\ln}^m - \frac{2}{a^2} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho(a)} \right) R_l^0(a)\, \beta_{\ln}^m \right],$$

$$f_{nl}^1 = \frac{\rho_1\, \rho'(a)}{\rho^2(a)} + \frac{k_1 h_n'(k_1a)}{h_n(k_1a)} , \quad f_{nl}^2 = k_1^2 \frac{h_n(k_1a)\, h_l''(k_1a) - h'_n(k_1a)\, h'_l(k_1a)}{h_n(k_1a)\, h_l(k_1a)} ,$$

$$f_{nl}^3 = \frac{i\, h_n'(k_1a)}{a^2 h_n(k_1a)} - k_1^2 \frac{j_l(k_1a)\, h_l''(k_1a) - j_l''(k_1a)\, h_l(k_1a)}{h_l(k_1a)} , \quad \beta_{\ln}^m = \int_0^{\pi} \sin^2\theta \cos\theta\, P_n^m(\cos\theta) \frac{d}{d\,\theta} P_l^m(\cos\theta) d\,\theta .$$

Краевые задачи (14), (25), (26) и (14), (27), (28) могут быть решены разными методами (сплайн-коллокации, стрельбы, степенных рядов и др.).

После решения краевых задач вычисляются коэффициенты A_{mn}^j . В результате получаем аналитическое описание рассеянного акустического поля с помощью выражений (8) и (12).

Рассмотрим дальнюю зону рассеянного акустического поля. Используя асимптотическую формулу для сферической функции Ганкеля первого рода при больших значениях аргумента ($k_1 r >> 1$) [10]

$$h_n(k_1r) \approx (-i)^{n+1} \frac{e^{ik_1r}}{k_1r} ,$$

из (8) и (12) находим

$$p_s \approx \frac{a}{2r} \exp(ik_1r) F(\theta, \varphi) ,$$

где

$$F(\theta, \varphi) = \frac{2}{k_1 a} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{n} (-i)^{n+1} (A_{mn}^0 + e\, A_{mn}^1) P_n^m(\cos\theta) \cos m(\varphi - \varphi_0) . \tag{29}$$

Численные исследования.

На основании выражения (29) были проведены расчеты диаграмм направленности $\left|F(\theta, \varphi)\right| / A_0$ в плоскости ($\varphi_0, \varphi_0 + \pi$) для сфероида, находящегося в воде ($\rho_1 = 10^3$ кг/м ^{3}, $c_1 = 1485$ м/с).

Полагалось $\theta_0 = \pi/4$, $\varphi_0 = 0$, $r_0 = 0.1$ м, $a = 1.1$ м.

Расчеты проводились как для однородного сфероида с плотностью $\overline{\rho} = 1.26 \cdot 10^3$ кг/м ^{3} и скоростью звука $\overline{c} = 1920$ м/с (глицерин), так и для неоднородного материала, механические характеристики которого менялись по радиальной координате по квадратичным законам

$$\rho = \overline{\rho}\ f(r), \quad c = \overline{c}\ f(r), \quad f_1(r) = 100\left(\frac{r - r_0}{a - r_0}\right)^2 + 1, \quad f_2(r) = 100\left(\frac{a - r}{a - r_0}\right)^2 + 1.$$

Зависимости $f_1(r)$ и $f_2(r)$ выбраны такими, что их графики являются зеркальным отображением друг друга относительно прямой $r = (r_0 + a)/2$. При этом функция $f_1(r)$ достигает максимума при $r = a$, а на поверхности шара при $r = r_0$ – минимума. Функция $f_2(r)$ достигает тех же максимальных и минимальных значений, но уже наоборот на поверхностях $r = r_0$ и $r = a$.

На рис. 2 – 4 представлены диаграммы направленности, рассчитанные для волнового размера сфероида $k_1 a$, равного 3, при $e = 0$, $e = -0.2$ и $e = 0.2$.

На рисунках сплошная линия соответствует однородному сфероиду, штриховая – неоднородному вида $f_1(r)$, пунктирная – неоднородному вида $f_2(r)$. Стрелкой показано направление распространения падающей плоской волны.

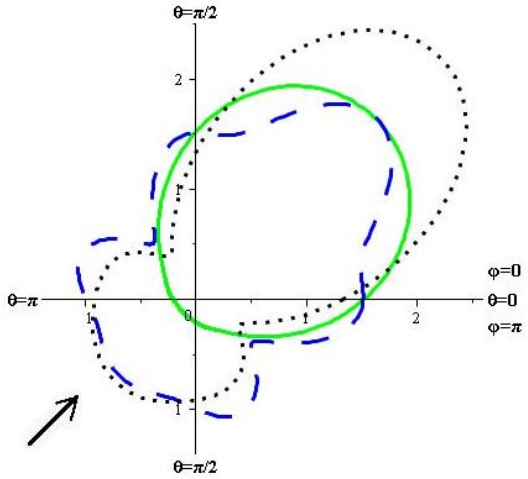


Рис. 2. Диаграммы направленности при $e = 0$

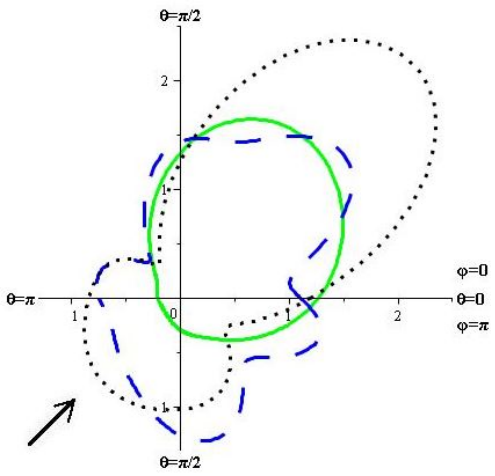


Рис. 3. Диаграммы направленности при $e = -0.2$

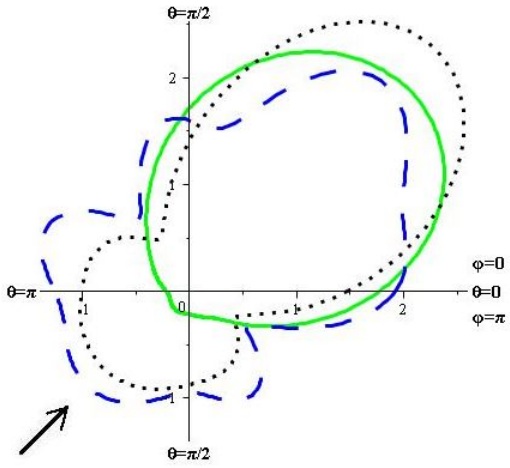


Рис. 4. Диаграммы направленности при $e = 0.2$

Диаграммы направленности рассеянного поля позволяют оценить звукоотражающие свойства тела в разных направлениях.

Расчеты показали, что форма полярной диаграммы направленности рассеянного поля в дальней зоне существенно зависит от конфигурации тела и закона неоднородности материала сфероида.

Список литературы

1. Толоконников Л.А., Шапошник Л.М. Дифракция звуковых волн на неоднородном сфероиде и неоднородном эллиптическом цилиндре // Известия Тульского государственного университета. Серия Математика. Механика. Информатика. 1996. Т. 2. Вып. 2. С. 141-151.

2. Толоконников Л.А. Дифракция плоской звуковой волны на неоднородном эллипсоиде вращения с малым эксцентриситетом // В сб. Диффер. ур-ния и прикл. задачи. Тула: Изд-во ТулГУ, 1997. С. 90-96.

3. Толоконников Л.А., Скобельцын С.А. Дифракция звуковых волн на неоднородных и анизотропных телах: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. 200 с.

4. Толоконников Л.А., Лобанов А.В. Дифракция плоской звуковой волны на неоднородном упругом сфероиде // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2011. Вып. 2. С. 176-191.

5. Толоконников Л.А., Лобанов А.В. О рассеянии плоской звуковой волны неоднородным упругим сфероидом // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2011. Вып. 3. С. 119-125.

6. Скобельцын С.А., Толоконников Л.А Дифракция плоской звуковой волны на упругом сфероиде с неоднородным покрытием в присутствии подстилающей поверхности // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 2. С. 64-75.

7. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Л.: Судостроение, 1972. 352 с.

8. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.

9. Селезов И.Т., Яковлев В.В. Дифракция волн на симметричных неоднородностях. Киев: Наукова думка, 1978. 146 с.

10. Иванов Е.А. Дифракция электромагнитных волн на двух телах. Минск: Наука и техника, 1968. 584 с.

Толоконников Лев Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, tolokonnikovla@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Окороков Данила Витальевич, студент, danila_okorokov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SCATTERING OF A PLANE SOUND WAVE BY AN INHOMOGENEOUS SPHEROID WITH A RIGID SPHERICAL INCLUSION

L.A. Tolokonnikov, D.V. Okorokov

An analytical solution of the scattering problem of a plane harmonic sound wave by a liquid inhomogeneous spheroid with a rigid spherical inclusion is obtained. The far zone of the scattered acoustic field is investigated.

Key words: scattering, sound waves, inhomogeneous spheroid, ideal liquid.

Tolokonnikov Lev Alekseevich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, tolokonnikovla@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Okorokov Danila Vitalevich, student, danila_okorokov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 620.1
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-447-448

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОТНИЩА РЕЗЕРВУАРА В ПРОЦЕССЕ РУЛОНИРОВАНИЯ НА КАРКАСЫ РАЗЛИЧНЫХ ДИАМЕТРОВ

Д.Д. Вагазова, Р.Р. Тляшева

Изготовление резервуаров методом рулонирования представляет собой один из передовых промышленных способов, позволяющий значительно сократить время монтажа. При этом стенки, днище и крыша резервуара поставляются на строительную площадку в виде рулонов, что минимизирует объём сварочных работ на месте и повышает качество сварных швов благодаря заводской двусторонней автоматической сварке. Напряженно-деформированное состояние свернутого в рулон полотнища резервуара, изготавливаемого индустриальным способом, существенно отличается от напряженно-деформированного состояния полотнища при полистовой сборке. В процессе рулонирования металл полотнища проходит различные стадии напряженно-деформированного состояния, структура которого характеризуется наличием упругих, упругопластических и пластических деформаций в поперечном сечении полотнища. Соотношение этих трёх стадий определяется существенными факторами, одним из которых является радиус сворачивания. Согласно действующей нормативной документации, допускается применять каркасы диаметром не менее 2,6 м. Однако, в связи со сложностями при транспортировке, есть необходимость рулонирования листов на каркасы диаметром менее 2,6 м. Задачей настоящего исследования являлось выявление возможности применения каркасов диаметром менее 2,6 м при толщине рулонируемых листов равных 4 мм.

Ключевые слова: резервуар, рулонирование, напряженно-деформированное состояние, НДС, полотнище.

НДС свернутого в рулон полотнища резервуара, изготавливаемого индустриальным способом, существенно отличается от НДС полотнища при полистовой сборке [1].

В методе рулонирования основные листовые элементы конструкции изготавливаются в виде полотнищ, которые собираются и свариваются из предварительно обработанных листов размером 1500х6000 мм.

Для удобства транспортировки изготовленные полотнища сворачивают в габаритные рулоны на специализированном стенде и поставляются на место монтажа [2-5]. Сворачивание полотнищ производится на специальный каркас или входящую в состав конструкции шахтную лестницу диаметром не менее 2,6 м, которая обеспечивает жесткость рулона в период транспортировки и погрузочно-разгрузочных работ. Максимальная высота рулонов составляет 18 м, а вес зависит от грузоподъемности подвижного состава.

После доставки рулонов до строительной площадки начинаются монтажные работы. На монтажной площадке после удаления удерживающих планок со свернутого в рулон полотнища последнее самопроизвольно, т.е. без приложения внешних сил и моментов, разворачивается под действием внутреннего момента на некоторый свободный радиус, подлежащий аналитическому определению. Причиной самопроизвольного разворачивания рулона является структура НДС сечения полотнища, сформированная в процессе рулонирования.

Следующей технологической операцией является дальнейшее разворачивание рулона на проектный радиус, но уже с приложением внешних усилий. По этой причине на проектном радиусе после окончательной сборки стенка резервуара имеет внутренний момент, направленный на сворачивание полотнища, который при определенных условиях может вызвать деформацию вдоль образующей резервуара к его центру.

В процессе рулонирования металл полотнища проходит различные стадии напряженно-деформированного состояния, структура которого характеризуется наличием упругих, упругопластических и пластических деформаций в поперечном сечении полотнища [6-8]. Соотношение этих трёх стадий определяется следующими существенными факторами. Первым фактором является радиус сворачивания.

Следующим фактором, определяющим структуру НДС поперечного сечения полотнища, является предел текучести стали. Повышение предела текучести стали является благоприятным фактором в контексте наличия остаточной пластической деформации металла полотнища.

Третьим фактором является толщина листов. Чем меньше радиус кривизны намоточной бабины, чем ниже предел текучести и чем больше толщина изгибаемых листов, тем больше остаточной пластической деформации будет наблюдаться в металле полотнища.

В процессе сворачивания полотнище, изначально плоское, подвергается изгибу [9, 10]. Изгиб полотнища при сворачивании можно рассматривать с достаточной степенью точности как чистый изгиб стержня из идеально упругопластического материала с сохранением гипотезы плоских сечений при упругопластическом изгибе. Рассмотрим напряженно-деформированное состояние полотнища в процессе рулонирования. При сворачивании полотнища в рулон относительная деформация крайних волокон определяется радиусом изгиба. Радиус изгиба полотнища определяется радиусом барабана, на который наматывается полотнище. Рассмотрим участок полотнища, подвергаемого сворачиванию. Процесс сворачивания полотнища в рулон будем рассматривать как чистый изгиб (рис. 1).

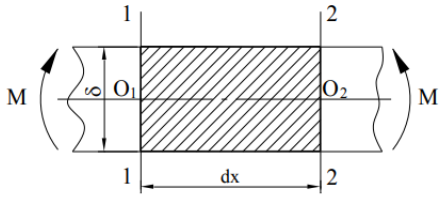


Рис. 1. Участок полотнища, подвергаемый сворачиванию: 1-1, 2-2 – бесконечно близкие друг к другу сечения, O1O2 – отрезок, принадлежащий нейтральному слою, δ – толщина полотнища, M – изгибающий момент

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние полотнища, свернутого в рулон радиуса $R_{св}$. Для простоты примем толщину полотнища постоянной (δ). dα – угол между бесконечно близкими сечениями 1-1 и 2-2 свёрнутого в рулон полотнища. z – расстояние от нейтрального слоя до рассматриваемого волокна. AB – удлинённое волокно при изгибе.

Таким образом, имеем:

$$O_1O_2 = dx = \rho d\alpha,$$
$$AB = (R_{св} + z)d\alpha.$$

Абсолютное удлинение волокна:

$$\Delta l = (R_{св} + z)d\alpha - R_{св}d\alpha = zd\alpha \quad (1)$$

Относительное удлинение волокна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{zd\alpha}{R_{св}d\alpha} = \frac{z}{R_{св}} \quad (2)$$

Следовательно, относительная деформация крайних волокон полотнища при сворачивании равна:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{2R_{св}} \quad (3)$$

Напряжение по толщине полотнища распределяются по линейному закону:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{Ez}{R_{св}} \quad (4)$$

Для моделирования напряженно-деформированного состояния полотнища резервуара в зависимости от диаметра каркаса была выбрана программа ABAQUS, которая помогает рассчитывать прочность разных конструкций [11-15]. Она очень популярна в нефтегазовой и нефтехимической отраслях, и используется многими известными компаниями, такими как Shell, BP и Exxon Mobil. Программа позволяет моделировать, как конструкции ведут себя под разными нагрузками, включая высокие температуры и внешние физические воздействия. Одно из главных её преимуществ – возможность использовать различные модели материалов. Что способствует получить достоверные результаты при расчётах и построении цифровых моделях.

В качестве материала полотнища выбрана сталь марки Ст3сп. Эта сталь широко применяется в нефтегазовой промышленности благодаря сочетанию прочности и пластичности. Сталь Ст3сп относится к углеродистым конструкционным сталям обыкновенного качества. Основным компонентом стали является феррит. Для повышения

прочности и пластичности в состав стали добавляют углерод, а также примеси, такие как сера, мышьяк, фосфор, медь, хром, марганец, никель и кремний. Содержание фосфора и серы влияет на пластичность и прочность стали. Точный химический состав и технология производства стали Ст3сп определяются необходимыми физическими и химическими свойствами. Механические характеристики стали Ст3сп представлены в таблице 1.

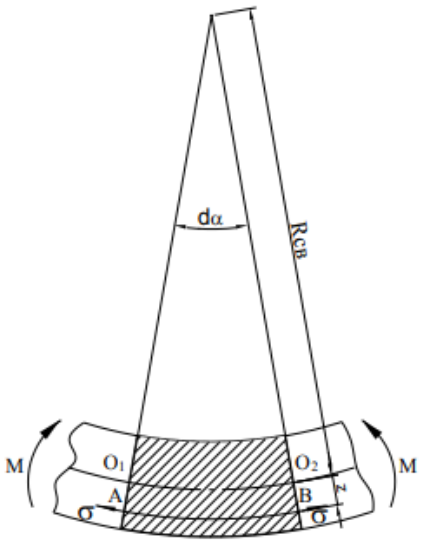


Рис. 2. Участок полотнища, свёрнутый в рулон радиуса ρ

Таблица 1

Механические свойства Ст3сп

Класс стали	Марка стали	ГОСТ	Механические свойства				
			E, МПа	σв, МПа	εв	σт, МПа	εт
С255	Ст3сп	14637-89	$2{,}1*10^5$	450	0,26	255	0,0032

Моделирование напряженно-деформированного состояния полотнища стенки резервуара толщиной 4 мм было выполнено для каркасов диаметрами 2,6 м, 2,4 м и 2,2 м. Результаты моделирования представлены на рисунках 3, 4 и 5 соответственно.

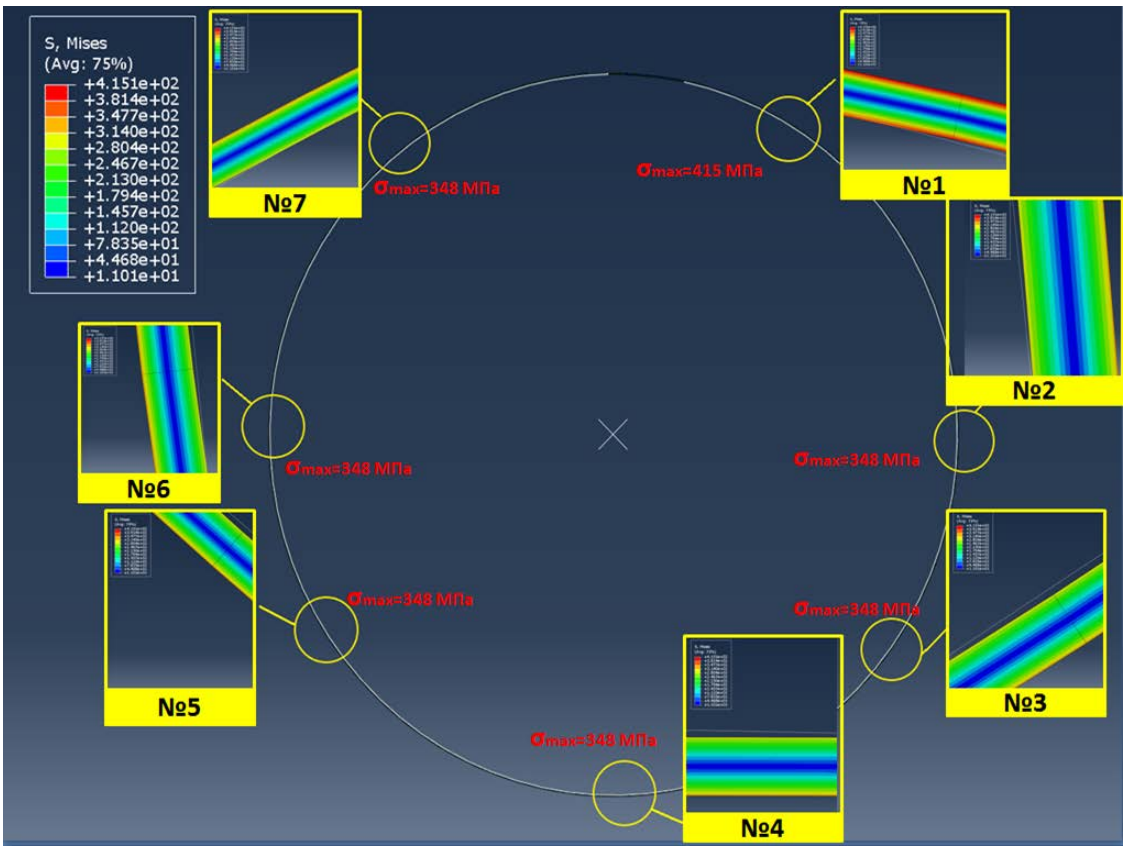


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние полотнища при рулонировании на каркас 2,6 м

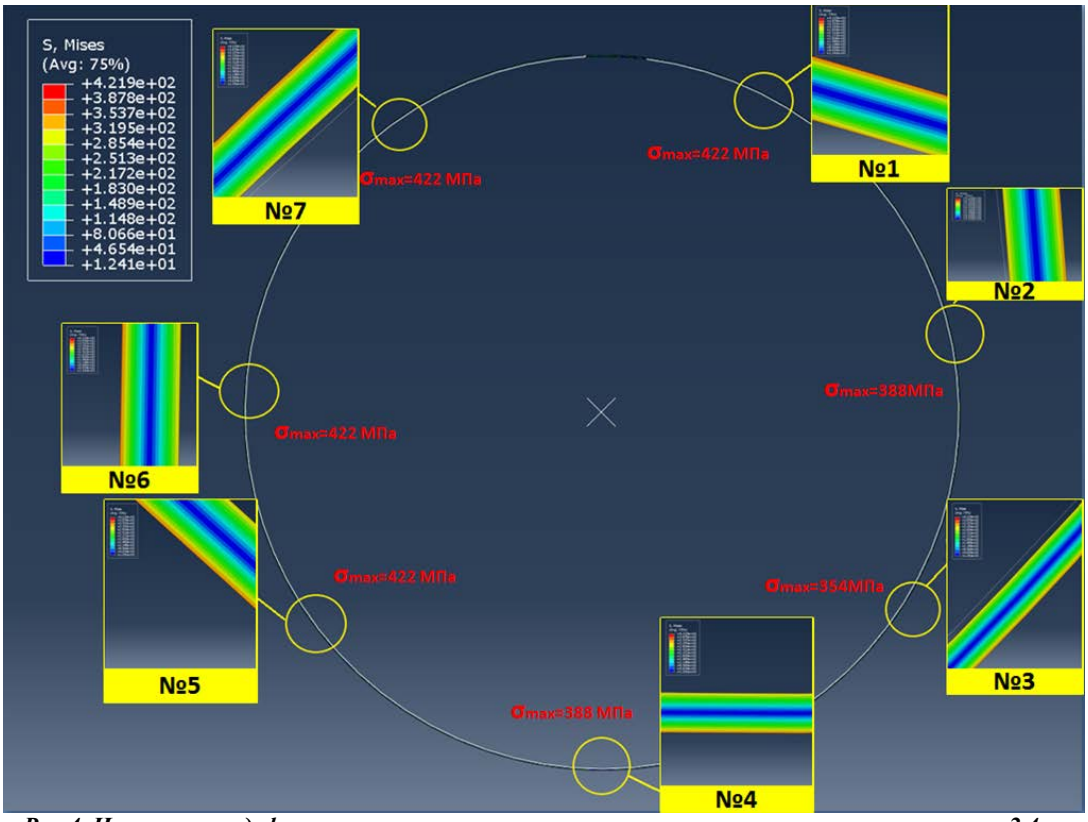


Рис.4. Напряженно-деформированное состояние полотнища при рулонировании на каркас 2,4 м

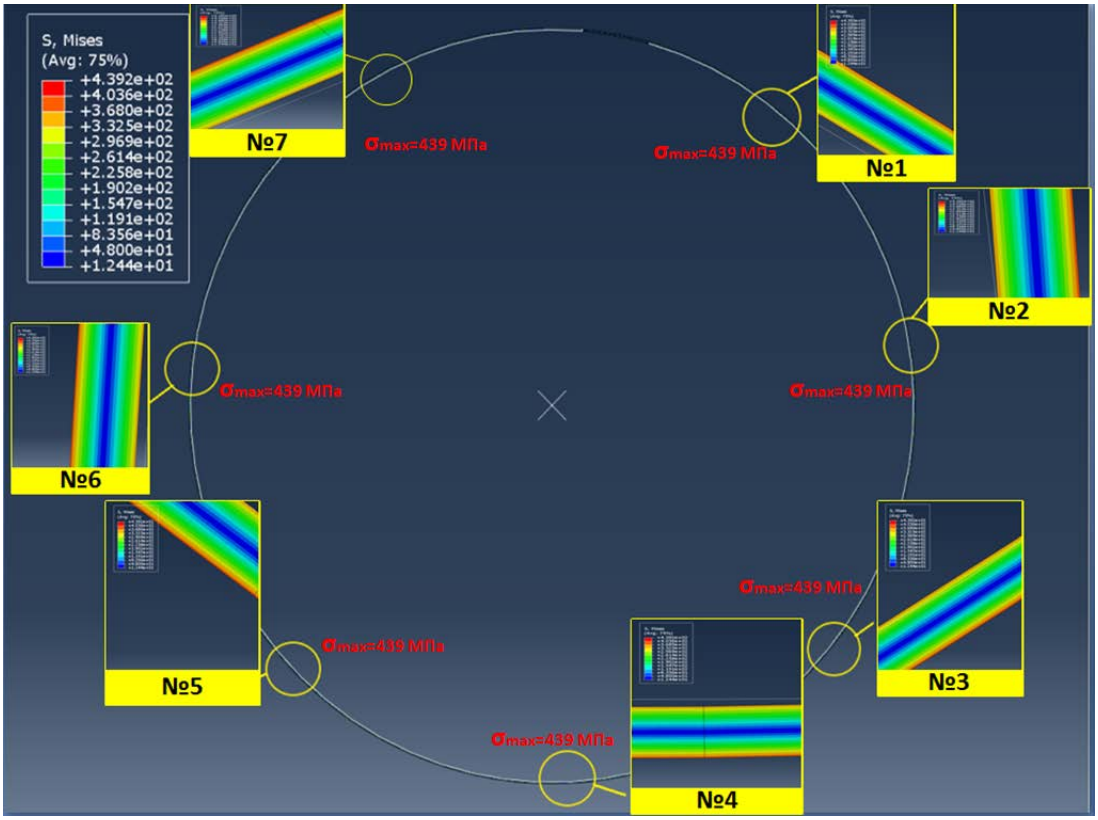


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние полотнища при рулонировании на каркас 2,2 м

Результаты расчетов напряжений для процесса рулонирования на каркас диаметром 2,6 м, 2,4 м и 2,2 м представлены в таблице 2.

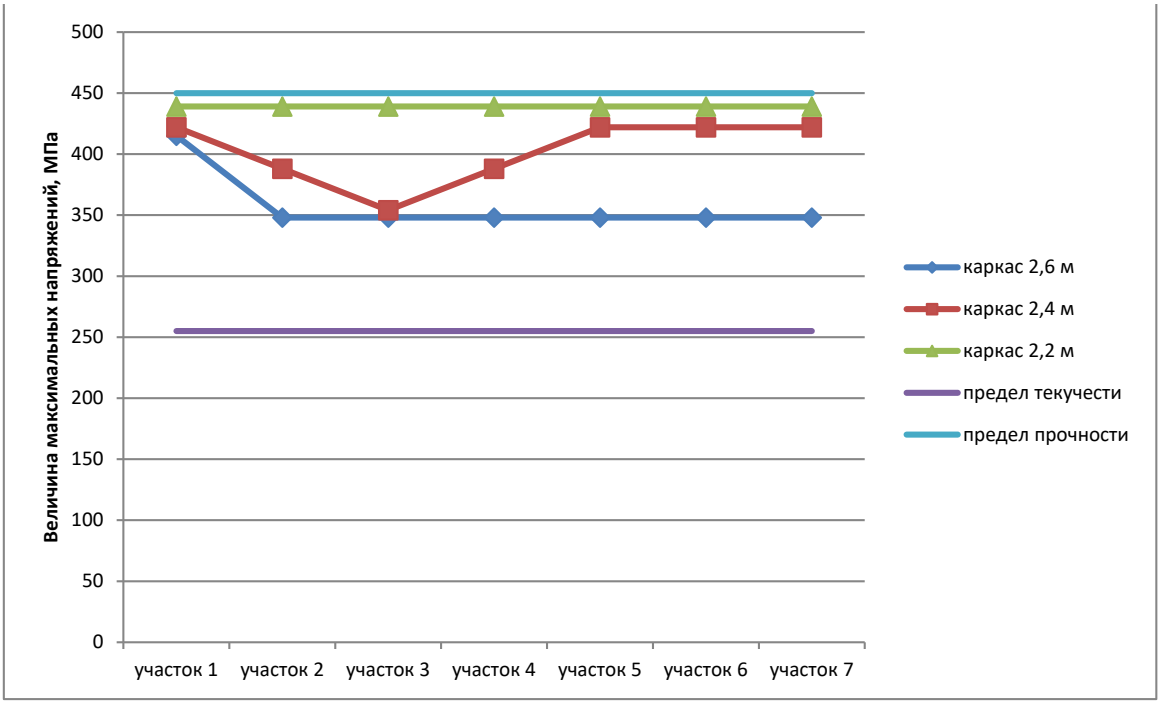


Рис. 6. График зависимости максимальных напряжений, возникающих на различных участках в рулоне полотнища

Таблица 2

Результаты расчетов

диаметр каркаса, м	максимальные напряжения на участках полотнища, МПа						
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
2,6	415	348	348	348	348	348	348
2,4	422	388	354	388	422	422	422
2,2	439	439	439	439	439	439	439

Напряжения в полотнище резервуара увеличиваются с уменьшением диаметра каркаса с 2,6 м до 2,2 м.

По результатам расчетов применение каркаса диаметром 2,4 допустимо, а 2,2 нежелательно, так как максимальные напряжения на всех участках практически достигают предела прочности, что может привести к значительным дефектам.

Список литературы

1. Комаров П.А. Определение радиуса вальцовки ремонтных вставок при ремонте стальных резервуаров, изготовленных методом рулонирования // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 4.

2. Насибуллина О.А., Тляшева Р.Р., Касинцева Д.Д. Повышение точности изготовления сварных корпусов аппаратов для обеспечения наилучшего теплообмена // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20. № 2. С. 148-154. – DOI 10.17122/ngdelo-2022-2-148-154.

3. Каримов Р.Ф., Баязитов М.И. Обеспечение прочности РВС-10000 на основе численного моделирования корректировки окраек днища в процессе монтажа // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 7 (121). С. 26-29.

4. Гафарова В.А., Шерматов Д.Н., Баязитов М.И., Арсланов А.Л. Разработка алгоритма создания цифрового двойника сварного соединения оболочковой конструкции (часть 1) // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 5. С. 198-211. – DOI 10.17122/ngdelo-2023-5-198-211.

5. Каравайченко М.Г. Прочность и живучесть резервуаров. М.: Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии, 2023. 524 с.

6. Баязитов М.И., Бердин В.К., Кузеев И.Р., Тляшева Р.Р. Оценка напряженно-деформированного состояния вертикальных резервуаров с нефтепродуктами с учетом внештатных ситуаций // Нефтегазовое дело. 2022. № 4. С. 21-45. – DOI 10.17122/ogbus-2022-4-21-45.

7. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Резников Д.О., Неганов Д.А. Анализ напряженно-деформированных и предельных состояний в экстремально нагруженных зонах машин и конструкций // Чебышевский сборник. 2017. Т. 18, № 3 (63). С. 394-416. – DOI 10.22405/2226-8383-2017-18-3-394-416.

8. Гафарова В.А., Шерматов Д.Н., Баязитов М.И., Арсланов А.Л. Изменение распределения магнитных характеристик в стальной оболочковой конструкции в результате формирования сварного соединения (часть 2) // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21. № 6. С. 252-263. DOI 10.17122/ngdelo-2023-6-252-263.

9. Баязитов М.И., Нугаев И.К. Совершенствование мониторинга надежности, определение основных целей технического обслуживания оборудования и понятий отказов // Современные технологии в нефтегазовом деле. 2021. Сборник трудов международной научно-технической конференции, Октябрьский, 26 марта 2021 года. С. 573-577.

10. Tarasenko A., Chepur P., Gruchenkova A. Numerical modeling of a vertical steel tank differential settlement development // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258. Pp. 60-70. DOI 10.1007/978-3-030-57450-5_6.

11. Abdrakhmanova K.N. Possibilities of an object digital twin application inorder to extend and predict safe operation resource // Science.Education. Practice: materials of the international University Science Forum, April 22, 2020. С. 182-186.

12. Каравайченко М.Г., Абдрафикова С.Р. Построение двухсетчатой купольной крыши резервуара // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9, № 3. С. 273-277. – DOI 10.28999/2541-9595-2019-9-3-273-277.

13. Каравайченко М.Г., Васильев А.В., Галимзянов Р.И. Анализ прочности, жесткости и плавучести понтонов для вертикальных цилиндрических резервуаров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9, № 6. С. 626-632. – DOI 10.28999/2541-9595-2019-9-6-626-632.

14. Абдрахманова К.Н., Тляшева Р.Р., Шерматов Д.Н., Кадыров Р.О., Гафарова В.А., Гимаев Р.А. Верификация цифровой модели нагружением оболочки внутренним давлением до разрушения // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2022. № 2. С. 5-19. – DOI 10.17122/ogbus-2022-2-5-19.

15. Степаненко Н.Ю., Чертовских С.В., Лукьянов В.В., Астанин В.В. Технология изготовления защитной кромки для полимерных композитных изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 197-203.

Вагазова Дарья Дмитриевна, аспирант, kasintsevadaria@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Тляшева Резеда Рафисовна, доктор технических наук, профессор, Rezedat@gmail.com, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE TANK PANEL IN THE PROCESS OF ROLLING ONTO FRAMES OF VARIOUS DIAMETERS

D.D. Vagazova, R.R. Tlyasheva

The production of tanks by rolling is one of the advanced industrial methods that significantly reduces installation time. At the same time, the walls, bottom and roof of the tank are delivered to the construction site in the form of rolls, which minimizes the amount of welding work on site and improves the quality of welds thanks to factory double-sided automatic welding. The stress-strain state of the rolled-up tank panel, manufactured in an industrial way, differs significantly from the stress-strain state of the panel during sheet assembly. In the process of rolling, the metal of the panel undergoes various stages of stress-strain state, the structure of which is characterized by the presence of elastic, elastic-plastic and plastic deformations in the cross section of the panel. The ratio of these three stages is determined by significant factors, one of which is the folding radius. According to the current regulatory documentation, it is allowed to use frames with a diameter of at least 2.6 m. However, due to the difficulties during transportation, it is necessary to roll the sheets onto frames with a diameter of less than 2.6 m. The objective of this study was to identify the possibility of using frames with a diameter of less than 2.6 m with a thickness of rolled sheets equal to 4 mm.

Key words: reservoir, rolling, stress-strain state, panel.

Vagazova Daria Dmitrievna, postgraduate, kasintsevadaria@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Tlyasheva Rezeda Rafisovna, doctor of technical sciences, professor, Rezedat@gmail.com, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University

УДК 620.178.311.62
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-452-453

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ С УЧЕТОМ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДА ЭТИЛЕНА С НАГНЕТАНИЯ КОМПРЕССОРА

А.Х. Габбасова, Р.Р. Юсупов, В.В. Масловская

В работе установлено, что для исключения возникновения резонанса в вибронагруженной трубопроводной системе необходима отстройка собственных частот от частот вынужденных колебаний для соответствующей степени свободы. Разработаны методика и рекомендации по такой отстройке, которые могут применяться в процессе проектирования трубопроводов, работающих в условиях вынужденных колебаний. Разработаны цельнометаллические демпферы для таких трубопроводов. Их использование позволяют получить более равномерную картину НДС систем и повысить их виброустойчивость.

Ключевые слова: эллиптическая заглушка; тройник трубопровода; вибрация; резонанс; демпфирующая конструкция; узел крепления.

Существенной особенностью компрессорных цехов является наличие вынужденных вибраций, вызванных работой компрессоров, режимами течения среды, а также вибрациями, возникающими при прохождении волн газа. Такие колебания могут серьезно повлиять на стабильность функционирования оборудования и даже стать причиной крупных сбоев и аварий.

При этом, более 75 % внеплановых остановок компрессорных цехов связано с выходом из строя вибронагруженных технологических трубопроводных систем. Из практики использования современных трубопроводных систем известно, что их вибрации могут достигать высоких уровней, с максимальными скоростями вибрации до нескольких сотен миллиметров в секунду.

Наиболее вибронагруженными являются участки трубопровода, имеющие изменение направления – отводы, врезки, тройники. Вибрации вызывают колебания трубопроводов и их опорных конструкций. Частые проблемы, вызванные повышенной вибрацией в трубопроводах, включают трещины в металле и на сварных соединениях, поломки труб, разрывы креплений и усталостное разрушение опорных конструкций, ослабление болтовых соединений, ошибочное активирование оборудования и сбои в работе концевых выключателей и др.

Однако, стандартные методы расчетной оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводных конструкций отстают от современных технических и технологических особенностей производства. Для критериальных оценок напряженно-деформированного состояния (НДС) вибронагруженных технологических трубопроводных систем и последующей оценки их ресурса, необходимо, прежде всего, знать уровень эксплуатационных напряжений и деформаций, возникающих в их элементах с обязательным учетом динамических возмущений.

Существующие методы и способы оценки их напряженно-деформированного состояния с учетом вынужденных колебаний, а также методы снижения вибрации трубопроводов, оказываются недостаточно эффективными [1-3]. Это может серьезно повлиять на стабильность функционирования оборудования и даже стать причиной крупных сбоев и аварий. Правильный обоснованный подбор при проектировании различных демпфирующих устройств может существенно снизить риск отказов таких систем [4-7].

В качестве метода исследования НДС такого класса трубопроводов обосновано использование численных методов конечных элементов, так как исследуемые конструкции представляются собой сложные линейные и пространственные трубопроводные обвязки, а решение краевых задач прочности требует задания сложных граничных условий, в том числе вынужденных колебаний [1, 2].

Целью работы является разработка научно обоснованных рекомендаций по проектированию или модернизации трубопроводных систем, работающих в условиях вынужденных колебаний.

Объектом исследования является опорный узел тройника в обвязке трубопровода нагнетания компрессора типа 4М25 - 425/22 холодильного отделения производства пиролиза углеводородов нефти одного из нефтехимических предприятий Республики Башкортостан. В работе приведен анализ схемы включения в технологическую схему, а также характеристик используемого компрессорного оборудования.

Приведены точки измерений вибраций (рис. 1, б), данные с результатами измерения вибрации (таблица) и результаты контроля цветным методом в месте обнаружения дефекта (рис. 1, а). Для исследования модели выбрано направление приложения силы с максимальной частотой 40 Гц и виброперемещением $37 \cdot 10^{-6}$ м.

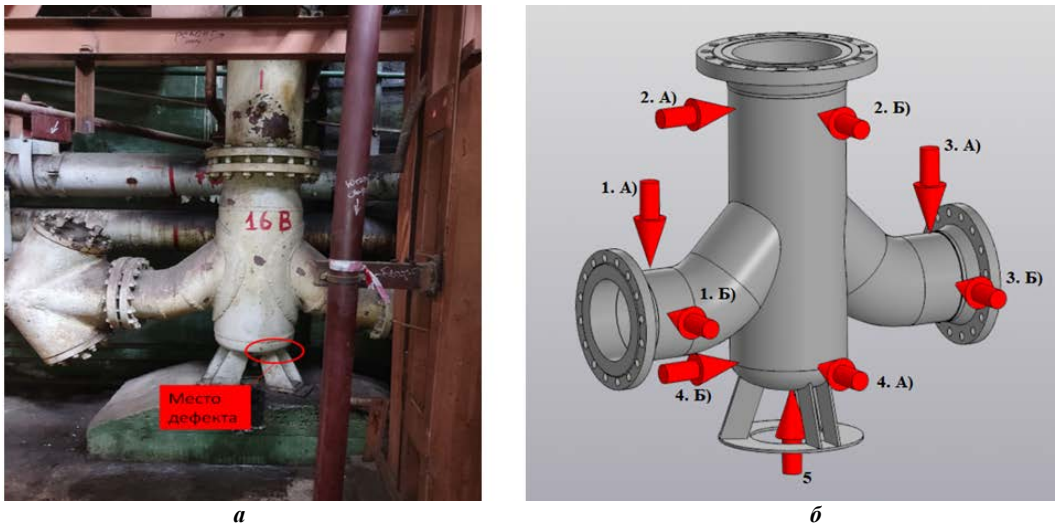
По полученным исходным данным проведен расчет виброускорения и силы, воздействующей на эллиптическую заглушку тройника. При f=40 Гц и $S=35 \cdot 10^{-6}$ м виброускорение составляет 49 м/с^2. Сила F, воздействующая на эту точку, будет составлять 29,4 кН.

Учитывая то, что воздействие силы, вызванная вибрацией, имеет знакопеременное значение, то можно считать, что каждая опорная пластина в области крепления локально воздействует на эллиптическую заглушку с давлением циклического характера, имея при этом значение, составляющее 9,8 МПа.

На основе полученных исходных данных далее проведено исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) опорного узла тройника трубопровода нагнетания этилена с учетом вынужденных колебаний.

Создана 3D модель исследуемого тройника с исходной конструкцией опорного узла.

Проведен расчет НДС в ПК Ansys Workbench с использованием модулей Harmonic respons.



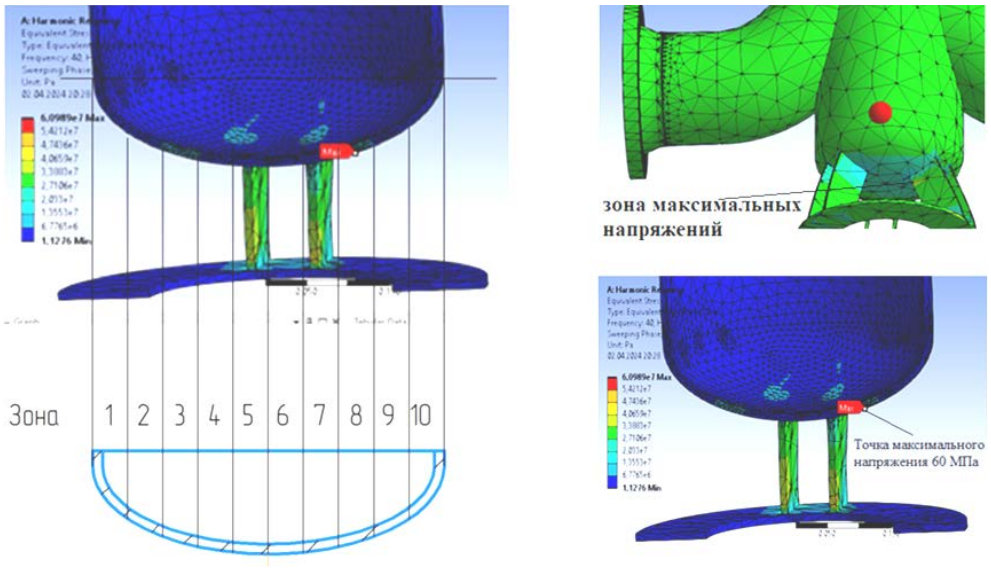
а *б*

Рис. 1. Сбор исходных данных о вибропараметрах тройника трубопровода: а – место образования трещины; б – места установки датчика

При подготовке модели к анализу в ПК Ansys Workbench указаны все внешние силы, действующие на модель - колебания по вертикальной оси с частотой 40 Гц, согласно таблице натурных замеров колебаний реальной конструкции тройника трубопровода, сила 29 кН, действующая на элемент, рассчитанная ранее. Данное направление колебаний тройника соответствует первой степени свободы. Получены результаты расчета НДС эллиптической заглушки [9-11]. Анализ НДС проведен по зонам распределения напряжений 1 – 10 (рис. 2, а).

Результаты замеров вибрации

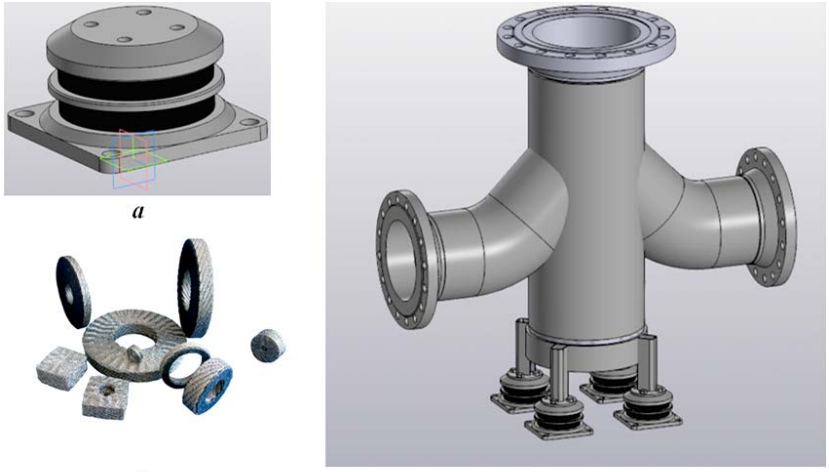
Номер точки замера	Направление	Частота (Гц)	Максимальное значение уровня вибрации (СКЗ, МКМ) среднеквадратичное значение виброперемещения в микронах, т.е. 10^{-6} м)
1	А) Вертикальное	40	31
	Б) Горизонтальное	2	185
2	А) Горизонтальное + 90°	40	35
	Б) Горизонтальное	2	184
3	А) Вертикальное	40	31
	Б) Горизонтальное	2	130
4	А) Горизонтальное + 90°	2	199
	Б) Горизонтальное	40	32
5	Вертикальное осевое по центру сферической заглушки	40	37



а *б*

Рис. 2. Зоны распределения напряжений в заглушке тройника и результаты расчета НДС тройника с исходной конструкцией опоры: а – место образования трещины; б – результаты расчета НДС

Локальное напряжение в эллиптической заглушке тройника при сжатии составляет 60 МПа в зоне 7-8-9 (см. рис. 2). Область распространения зоны напряжения смещено ближе к опорам. Видно, что концентраторами напряжений является область крепления опор к эллиптической заглушке. Полученный результат расчета НДС модели показывает локализацию (зона 7-8-9), возникающих напряжений на том же участке, где была обнаружена трещина в исследуемом тройнике (см. рис. 1, а). Показано, что модель идентична реальной конструкции тройника, нагрузки и закрепления заданы верно.



а

б *в*

Рис. 3. Демпфирующая конструкция узла крепления тройника трубопровода: а – общий вид опоры; б – цельнометаллические демпфирующие подушки; в – общий вид модернизированного опорного узла в сборе

Для снижения нагрузок, воздействующих на днище, вызванных вибрацией, предотвращения возникновения недопустимых дефектов и, как следствие, аварийных ситуаций, разработана демпфирующая конструкция узла крепления тройника трубопровода. Предложено решение по демпфированию трубопровода в продольных направлениях с переносом места крепления опорных пластин с торцевой эллиптической заглушки тройника на опорную юбку

и с установкой четырех ножек, опирающихся на демпферы (рис. 3). Такая конструкция позволяет перемещаться и гасить колебания в вертикальной плоскости и исключает перемещения в горизонтальном направлении (рис. 3, а). Общий вид модернизированного опорного узла в сборе представлен на рис. 3, в. В конструкции используются демпфирующие подушки для амортизации вибраций.

Кроме того, в работе осуществлен подбор материального исполнения демпфирующих подушек. На практике в качестве демпфера можно использовать резиновые, полиуретановые и цельнометаллические подушки. Описаны их преимущества и недостатки. Приведены технические характеристики цельнометаллических демпферов, которые изготавливаются из прессованной вязальной нержавеющей стальной CrNi арматурной проволоки, которая прессуется в требуемую геометрическую форму (рисунок 3, б) [8].

Дальнейшее исследование, в том числе расчет НДС предложенной опорной конструкции удобно также провести в ПК Ansys. Однако, в базе эластичных материалов ПК Ansys отсутствуют цельнометаллические, но, при этом, имеются резиновые структуры. Поэтому далее проведен сравнительный анализ механических характеристик этих материалов.

Сравнительный анализ тестирования цельнометаллического демпфера и резинового демпфера при статической нагрузке показал, что разница перемещений подушек при максимальных нагрузках составляет 10 %, что несущественно и этим можно пренебречь. Показано, что решение принять резину материалом подушки в расчетах демпфирующего узла тройника является справедливым.

Далее проведен расчет НДС тройника с демпферами в ПК Ansys Workbench с использованием модуля Harmonic respons. Максимальные напряжения 7,5 кПа возникают в опорных стойках демпферного узла, а минимальные 0,9 кПа в месте крепления опорного узла к эллиптической заглушке тройника.

При этом, основную часть нагрузки берут на себя демпферы за счет деформации подушек. Такое поведение характеризуется способностью к рассеванию полученных колебаний, а также гашение амплитуды колебаний. Демпфирование опор снижает передачу колебаний от источника на защищаемую конструкцию, это достигается за счет поглощения энергии и рассогласования частот. Опоры с низкой динамической жесткостью смещают собственную частоту колебаний системы в более низкую область, что позволяет избегать совпадения с частотой внешних возбуждающих воздействий.

Сравнительный анализ результатов расчета НДС тройника с исходной и модернизированной конструкцией опоры показал, что при использовании исходного варианта опоры наблюдается (рис. 4, а) резко неравномерная картина напряжений с минимальными значениями и плавным ростом в зонах 1-6 от 6 МПа до 12 МПа и со скачком в зоне 7-8-9 от 24 МПа до 62 МПа и резким в зонах 9-10 снижением напряжений до 5 МПа. Коэффициент концентрации напряжений Кσ составляет 10,3.

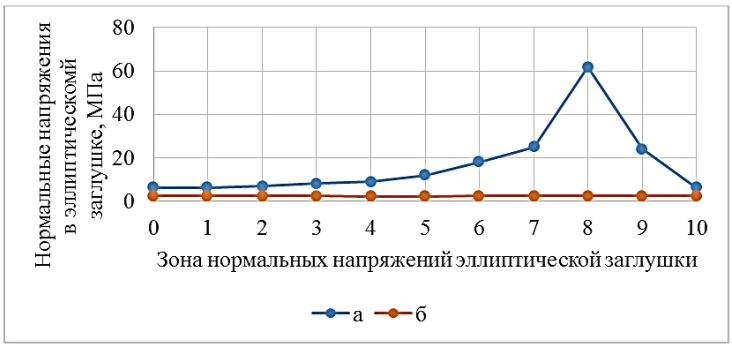


Рис. 4. Сравнительный график нормальных напряжений в эллиптической заглушке тройника: а – с исходным вариантом опоры; б – с модернизированной опорой

При использовании модернизированной опоры напротив наблюдается (рис. 4, б) равномерная картина напряженно-деформированного состояния во всех зонах 1-10 заглушки не превышающей 3 МПа Коэффициент концентрации напряжений Кσ составляет 1,3. Видно, что опорный узел с демпфером позволяет снять все скачки напряжений.

Помимо расчета напряжений, возникающих в эллиптической заглушке тройника, рассчитаны напряжения, возникающие в опорных стойках исходной конструкции и демпфирующей конструкции.

В исходной конструкции наблюдается резко неравномерная картина НДС – максимальные напряжения на небольшом участке 8 мм в центре лапы и являются разнонаправленными от минус 14 МПа на высоте 66 мм от основания и до плюс 14 МПа на высоте 78 мм от основания (см. рис. 2).

В демпфирующей конструкции, напротив, видно, что вертикальный элемент модернизированного опорного узла испытывает практически равномерные нагрузки без резких скачков. Максимальное напряжение в лапе составляет минус 6 МПа на высоте 150 мм от основания. Такое распределение напряжений исключает возникновение опасных сечений в опорах.

Далее проведены расчеты НДС тройника в ПК Ansys Workbench с использованием модуля Modal. Места закрепления и приложения сил задаются аналогично модулю Harmonic response. Проведенный модальный анализ - расчет частот собственных колебаний тройника с исходной конструкцией опоры в зависимости от степени свободы - показал, что в такой модели рассматривается первая степень свободы, которая имеет собственную частоту колебаний равную 248,58 Гц. Модальный анализ модели тройника с конструкцией демпфирующего опорного узла проводился для 6-ти степеней свободы.

Проведен сравнительный анализ зависимости частот собственных колебаний тройника от степени свободы колебаний, из которого видно, что конструкция тройника с демпфером имеет более высокие частоты собственных колебаний, составляющие 275 Гц для первой степени свободы, в отличие от собственных колебаний тройника с исходной конструкцией опоры 247 Гц.

При этом, размер, количество и жесткость этих демпферов подобраны таким образом, чтобы частота собственных колебаний всей системы «тройник-опора» 275 Гц различалась примерно в 6 – 8 раз, чем частота ее вынужденных колебаний 40 Гц (см. таблицу). Следовательно, конструкция тройника с демпфирующей опорой не сможет войти в резонанс с вынужденными колебаниями.

Частотные и амплитудно-частотные характеристики элементов и механических систем в целом во многом определяют их надежность. Анализ этих характеристик позволяет оценить возможность возникновения резонансных режимов на различных технологических режимах работы и дать оценку устойчивости систем к колебательным процессам.

Так, на рис. 5 видно, что исходный вариант конструкции тройника имеет минимальные амплитуды, не превышающие 100 кПа на частотах от 4 до 20 Гц и резкое повышение амплитуды до 340 кПа на частотах от 20 до 30 Гц. На частоте 40 Гц амплитуда конструкции тройника равна 100 кПа. Причем, эта частота совпадает с частотой вынужденных колебаний тройника (см. таблицу).

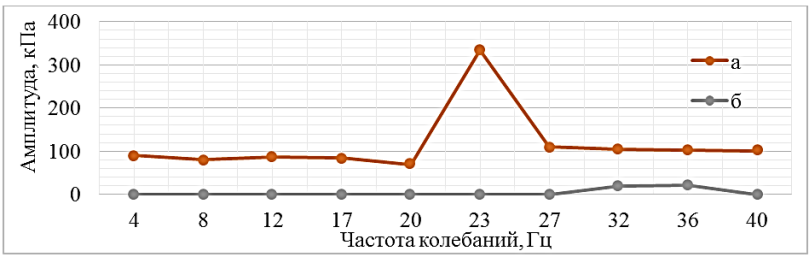


Рис. 5. Сравнительный график частотных характеристик тройника: а – с исходным вариантом опоры; б – с модернизированной опорой

Для конструкции тройника с демпфирующим опорным узлом (см. рис. 5) характерно плавное повышение амплитуды от 0,028 до 0,2 кПа в диапазоне частот от 4 до 38 Гц. На частоте 40 Гц (частоте вынужденных колебаний) амплитуда колебаний тройника составляет всего 0,062 кПа.

Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод, что проведенная модернизация опорного узла позволила снизить напряжения, действующие на опоры. Так же, использование такого опорного узла позволило снять скачки напряжений на корпусе эллиптической заглушки тройника, в которой при исходном варианте опоры часто возникал дефект в виде трещины (см. рис. 1, а).

Установлено, что для исключения возникновения резонанса в вибронагруженной трубопроводной системе необходима отстройка собственных частот от частот вынужденных колебаний в 6 – 8 раз для соответствующей степени свободы. Использование цельнометаллических демпфирующих опорных устройств для тройника трубопровода этилена, размер, количество и жесткость демпферов которых подобраны, чтобы частота собственных колебаний 275 Гц системы в области первой степени свободы была отстроена от частоты ее вынужденных колебаний 40 Гц, позволяет избегать резонансного с ними совпадения, в отличие от опоры с низкой динамической жесткостью, смещающей собственную частоту в более низкую область.

Таким образом, разработаны методики математического моделирования и оценки НДС с учетом вынужденных колебаний, а также методики и рекомендации по отстройке частотных характеристик вибронагруженных систем в ПК Ansys Workbench с использованием модулей Harmonic respons и Modal. Они могут применяться в процессе проектирования, модернизации, реконструкции и нового капитального строительства технологических трубопроводов, работающих в условиях вынужденных колебаний, по алгоритму, представленному в работе.

Кроме того, разработаны цельнометаллические демпфирующие конструкции опорных узлов, которые могут использоваться для конструкций технологических трубопроводных систем, работающих в условиях вынужденных колебаний. Использование демпферов позволяет изменить частоты собственных колебаний, так как опоры с низкой динамической жесткостью смещают собственную частоту колебаний системы в более низкую область. Это позволяет избегать совпадения с частотой внешних возбуждающих воздействий.

Демпферы способны гасить амплитуды колебаний для данных моделей в 1700 раз, что видно (см. рис. 5) при сравнении пиковых значений амплитуд колебаний тройника исходной конструкции 340 кПа и варианта с демпфирующей опорой 0,2 кПа. Демпфирование опор снижает передачу колебаний от источника на защищаемую конструкцию. Такой результат достигается за счет поглощения энергии и рассогласования частот.

Установлено, что использование цельнометаллических демпфирующих устройств позволяют получить более равномерную картину напряженно-деформированного состояния вибронагруженных трубопроводных систем конструкций и повысить их виброустойчивость за счет снижения амплитуды напряжений на частотах вынужденных колебаний до 1700 раз. Использование таких устройств для тройника трубопровода этилена позволяет снизить концентрацию напряжений в системе в 7,9 раз и в 1613 раз их амплитуду в конструкции на частоте вынужденных колебаний 40 Гц.

Таким образом, рассеивание и гашение колебаний являются ключевыми функциями демпфирующих опор, реализуемыми за счет их динамической жесткости.

Список литературы

1. Маняпова Г.И., Габбасова А.Х. Надежность технологических трубопроводов из стали марки сталь 20 при изменении ее свойств под длительным влиянием эксплуатационных факторов // В сборнике: 69-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. Уфа: ФГБОУ ВО «УГНТУ». 2018. С. 324.

2. Зыков А.В. Габбасова А.Х. Исследование влияния вынужденных колебаний на долговечность трубопроводов // Сборник материалов конференции: 55-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГНТУ. 2004. С. 360.

3. Токарев П. Снижение вибрации трубопроводной обвязки насосов на нефтеперекачивающих станциях при помощи виброизоляторов с отрицательной жесткостью // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2018. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-vibratsii-truboprovodnoy-obvyazki-nasosov-na-nefteperekachivayuschih-stantsiyah-pri-pomoschi-vibroizolyatorov-s (дата обращения: 26.08.2024).

4. Пат. RU209523U1 Российская Федерация, МПК F16F 3/08. Регулируемая виброопора со сферическими упругими демпферами/ Корнеев А.Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». 2021124466; заявл. 25.11.2020; опубл. 31.03.2021. 4 С.

5. Пат. RU2020138796U Российская Федерация, МПК F16F5/00. Демпфер вязкого трения/ Дмитриев В.С., Панфилов Д.С., Дердиященко В.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». 2021131948; заявл. 16.08.2021; опубл. 16.03.2022. 3 С.

6. Пат. RU2785099C1 Российская Федерация, МПК F16F 13/16. Виброизолирующая опора/ Лебединский И.Ю., Сиротин П.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Нижневартовский государственный университет». 2022124679; заявл. 06.07.2022; опубл. 02.12.2022.

7. Пат. RU2668764C1 Российская Федерация, МПК F16F 13/16. Пространственный виброизолятор/ Кочетов О.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». 2017937351; заявл. 05.09.2017; опубл. 02.10.2018.

8. Silentflex. Виброопоры и виброизоляторы. Производство виброизоляторов, виброопор, демпферов и антивибрационных систем [Электронный ресурс]. URL: https://silentflex.ru (дата обращения 21.08.2024).

9. Юсупов Р.Р. Напряженно-деформированное состояние трубопровода этилена высокого давления с учетом вынужденных колебаний // Актуальные проблемы науки и техники - 2023. XVI международная научно-практическая конференция молодых ученых. Уфа: Издательство «Нефтегазовое дело», 2023. С. 93.

10. Юсупов Р.Р., Габбасова А.Х. Оценка НДС демпферов для снижения уровня вынужденных колебаний трубопроводных систем // Материалы 75-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2024. С. 412.

11. Степаненко Н.Ю., Чертовских С.В., Лукьянов В.В., Астанин В.В. Технология изготовления защитной кромки для полимерных композитных изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 197-203.

Габбасова Айгуль Хайриваровна, канд. техн. наук, доцент, ai_gabi@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Юсупов Рамиль Римович, аспирант, nc-ufa@yandex.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Масловская Валентина Валерьевна, студент кафедры технологических машин и оборудования, maslovskaya.valya@gmail.com, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE TAKING INTO ACCOUNT FORCED OSCILLATIONS OF ETHYLENE PIPELINE FROM COMPRESSOR DISCHARGE

A.Kh. Gabbasova, R.R. Yusupov, V.V. Maslovskaya

The paper establishes that in order to eliminate resonance in a vibration-loaded pipeline system, it is necessary to tune the natural frequencies from the forced oscillations frequencies for the corresponding degree of freedom. A methodology and recommendations for such tuning have been developed, which can be used in the pipelines designing process operating under forced oscillations. All-metal dampers have been developed for such pipelines. Their use allows obtaining a more uniform systems stress-strain state shape and increasing their vibration resistance.

Keywords: elliptical plug; pipeline tee; vibration; resonance; damping structure; fastening unit.

Gabbasova Aigul Khayrivarovna, Ph.D.&., Associate professor, ai_gabi@mail.ru, Rus-sia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Yusupov Ramil Rimovich, postgraduate student, nc-ufa@yandex.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Maslovskaya Valentina Valerievna, student, maslovskaya.valya@gmail.com, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 621.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-458-589

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖГУТОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

А.О. Кунафина, С.В. Чертовских

В работе рассмотрены вопросы надежности электрических жгутов геофизических приборов, выделены две основные причины отказа: обрыв цепи и короткое замыкание, сформировано «Дерево неисправностей» жгутов в процессе их производства.

Ключевые слова: жгут, геофизический прибор, радиоэлектронная аппаратура, электроника.

Электрический жгут – это конструкция из двух и более изолированных проводов, скрепленных при помощи связывания ниткой или изоляционной лентой в пучок или каким-либо другим способом. Жгут и жгутовые сборки предназначены для электрической связи между элементами аппарата, прибора или устройств современной радиоэлектронной аппаратуры. [1-4] Жгуты классифицируются на две категории в зависимости от способа применения: внутриблочные и межблочные.

Ключевые отрасли, такие как космическая индустрия, авиация, железнодорожный транспорт, автомобилестроение, судостроение, оборонная промышленность используют жгуты, соответствующие актуальным требованиям в каждой сфере, исключением не являются нефтегазовая отрасль, где обширно используются геофизические приборы [5-7], в составе которых жгуты выступают сборочными единицами.

Геофизическое оборудование играет важную роль в нефтегазовом секторе, поскольку оно необходимо для успешной разработки месторождений и дальнейшего развития отрасли.

Поскольку геофизическая техника является дорогостоящей, к ней предъявляются высокие требования относительно качества и надежности. Дороговизна обуславливается несколькими причинами, которые связаны со сложной конструкцией, высокими требованиями к точности и специфическим условиям эксплуатации.

Основными факторами высокой стоимости являются:

– Высокотехнологичные компоненты, так как оборудование разрабатывается с использованием новейших технологий, включая сенсоры высокой точности. Датчики должны регистрировать минимальные изменения физических полей (например, магнитного, гравитационного, акустического), что требует разработки чувствительных и надежных измерительных систем.

– Электроника. Встроенные микросхемы и процессоры должны обеспечивать высокую скорость обработки данных и минимальные ошибки, что увеличивает стоимость производства.

– Материалы. Используются специальные материалы, устойчивые к экстремальным условиям (высокое давление, низкие температуры, коррозия).

Специфические условия эксплуатации, так как геофизическое оборудование часто применяется в сложных и труднодоступных условиях:

– глубокие морские и наземные исследования (требуется устойчивость к высоким давлениям и коррозионным средам);

– экстремальные температуры (аппаратура должна работать как в жарких пустынях, так и в условиях арктического холода);

– шумозащищенность (устройства должны избегать влияния внешних шумов, например, вибраций или электромагнитных помех).

Низкий объем производства, так как оборудование изготавливается небольшими партиями для узкого круга заказчиков, таких как научные организации, нефтегазовые компании или горнодобывающие предприятия. Это приводит к увеличению себестоимости каждой единицы.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что стоимость геофизического оборудования оправдана высокой точностью, сложностью технологии, условиями эксплуатации и ограниченным рынком. Это сложная техника, от которой зависят результаты исследований и эффективность работ в экономически значимых областях, соответственно, к входящим в состав оборудования жгутам предъявляются аналогично высокие требования.

Роль жгута в геофизическом приборе заключается в том, что он связывает между собой составные блоки прибора, которые необходимы для выполнения различных исследований, например, определение основных свойств грунтов и другие, и передает электрический сигнал на наземную установку посредством связи с каротажным кабелем (рис. 1). В процессе исследования в скважинах геофизический прибор измеряет или регистрирует параметры такими методами как, электрические и электромагнитные, ядерно-физические, акустические и другие, а также осуществляет линейно-угловые и многие виды механических измерений.

Основываясь на принципе работы, можно сделать вывод, что главная функция электрического жгута – передача электрических сигналов. Однако эта функция может быть нарушена из-за обрыва цепи или короткого замыкания, которые могут возникнуть вследствие повреждения изоляции и токоведущих жил. Из-за возникновения отказов в работе электрического жгута возможны негативные последствия начиная от некорректной передачи данных до полного отказа прибора, что в свою очередь может понести финансовые потери.

Рассмотрим подробнее вероятные отказы. Повреждение изоляции может быть механическим (обрыв, истирание, надрез) или термическим (оплавление, обугливание). Это может привести к замыканию токоведущих жил между собой или на корпус, что вызовет некорректную работу или выход из строя электрической схемы прибора.

Повреждение токоведущих жил, выраженное в обрыве всех жил провода, ведёт к нарушению работы или поломке электрической схемы прибора. Также повреждение или обрыв части жил снижает механическую прочность провода, что в итоге вызывает обрыв оставшихся жил и может привести к локальному перегреву и плавлению изоляции или её прогоранию.

Нежелательные ситуации могут привести к тому, что прибор может отказать частично или полностью, выйдут из строя другие блоки, а также возникает риск возникновения пожара или несчастного случая с персоналом, который работает с данным оборудованием. Перечисленные негативные факторы могут возникать как при эксплуатации, так и во время производства изделия. Рассмотрим подробнее процесс производства.

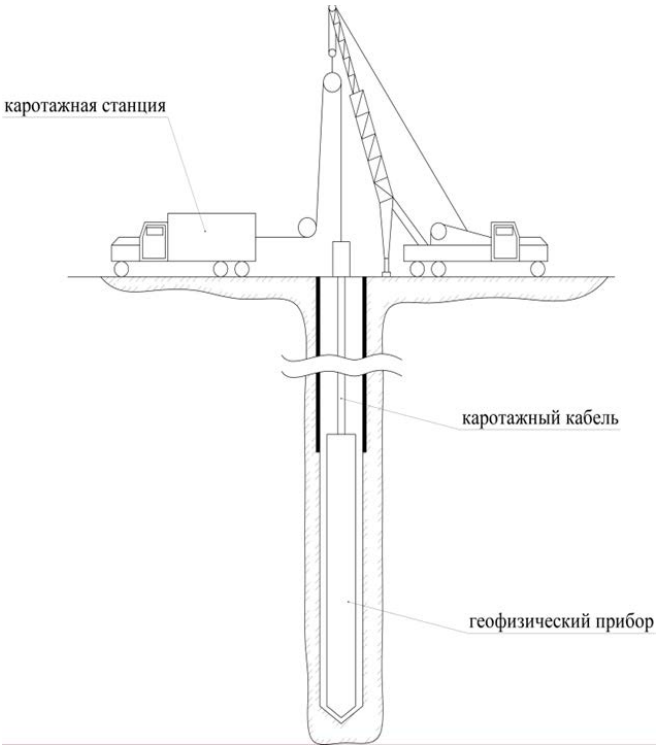


Рис. 1. Работа геофизического прибора в скважине

Процесс производства данных изделий зависит от типа производства и особенностей оборудования, в котором будут использоваться жгуты. Для жгутов, применяемых в геофизических приборах, можно выделить следующие операции:

– резка проводов;
– зачистка изоляции проводов;
– установка разъемов;
– формирование жгута;
– сращивание проводов пайкой (при недостаточной длине проводов);
– вязка (скрепление пучков проводов с помощью электроизоляционной ленты);
– контроль качества (проверка целостностей цепей жгута с помощью мультиметра).

По описанию вышеуказанных операций, технологический процесс не является сложным, но требует не меньшего внимания и ответственного отношения. В процессе производства могут возникать различные случаи, которые могут отразиться на качестве готового изделия.

Для анализа причин возникновения дефектов использовался метод логического диаграммного анализа «Дерево неисправностей» (рисунок 2) в соответствии с ГОСТ Р 27.302-2009 [8]. В нем отражены основные события, которые могут повлиять на работу готового электрического жгута после производства. Рассмотрим его более подробно.

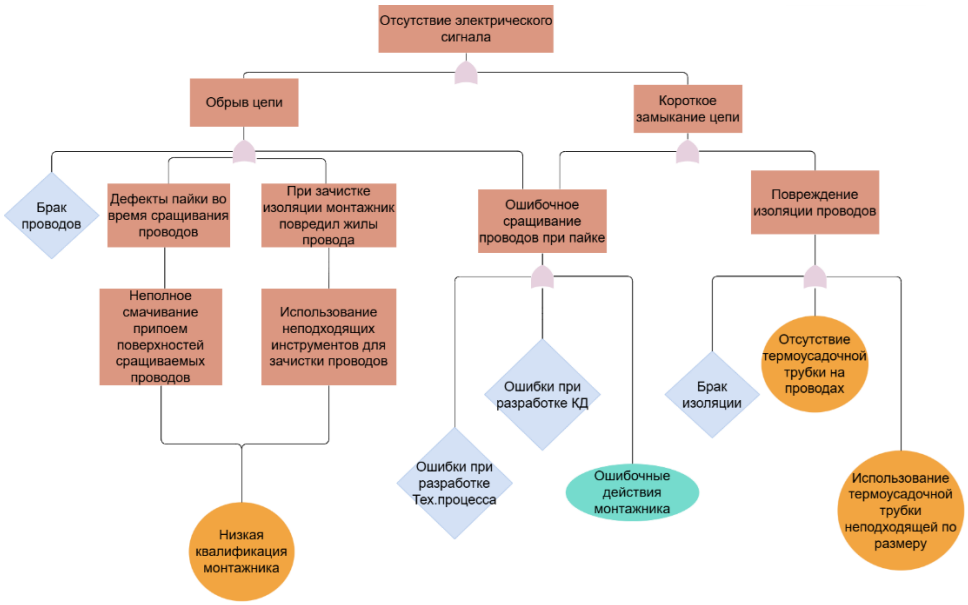


Рис. 2. «Дерево неисправностей» жгутов в процессе производства

На верхнем уровне выделены две основные проблемы:

1.Обрыв цепи.

2.Короткое замыкание цепи.

Каждая из них далее разделяется на более конкретные причины, которые подробно описаны на нижних уровнях.

Обрыв цепи в электрических жгутах происходит из-за снижения сопротивления изоляции до недопустимо низкого уровня. Это может быть связано с механическими воздействиями, износом изоляции, а также с нарушением правил монтажа жгутов.

В «Дереве неисправностей» представлены следующие причины возникновения обрыва цепи:

– дефекты пайки во время сращивания проводов;

– неполное смачивание припоем поверхностей сращиваемых проводов.

Данные факторы могут указывать на низкую квалификацию монтажника, что приводит к неправильному выполнению пайки.

Использование неподходящих инструментов для зачистки проводов. Монтажник мог повредить жилы проводов из-за неправильного выбора инструментов. Повреждение жил провода при зачистке изоляции также связано с применением неподходящих инструментов для зачистки.

Причиной ошибочного сращивания проводов при пайке могут быть:

– ошибки при разработке конструкторской документации (КД), неверные данные в документации могут привести к неправильной пайке;

– ошибки при разработке технологического процесса;

– недоработки в технологическом процессе также провоцируют неправильное сращивание;

– ошибочные действия монтажника (неправильное выполнение действий, обусловленное недостаточным опытом или квалификацией).

Короткое замыкание в электрических жгутах может происходить по следующим причинам:

– повреждение изоляционного слоя;

– неправильное соединение фазного и нулевого проводов.

Причинами короткого замыкания цепи, отраженные в «Дереве неисправностей», являются повреждение изоляции проводов, которое может возникнуть из-за отсутствия термоусадочной трубки на проводах в местах их сращивания. Это действие связано с невнимательностью или ошибками монтажника. Использование термоусадочной трубки неподходящей по размеру также приводит к браку изоляции.

На данном «Дереве неисправностей» четко прослеживаются зависимости между причинами неисправностей и возможными проблемами.

Основными факторами являются:

– человеческий фактор (низкая квалификация монтажников и их ошибочные действия занимают значительную долю причин);

– ошибки в КД или технологическом процессе;

– инструменты и материалы (использование неподходящих инструментов и материалов может привести к повреждению проводов или изоляции).

Данное «Дерево неисправностей» позволяет легко определить, какие аспекты необходимо улучшить, чтобы минимизировать вероятность возникновения неисправностей.

Таким образом, электрические жгуты являются неотъемлемой частью современных технических систем, от надежности которых зависит функционирование сложного оборудования такого как геофизический прибор. Для предотвращения обрывов цепей и коротких замыканий необходимо строго соблюдать технологию производства, контролировать качество изоляции, паяных соединений и обмотки жгутов. Применение методов анализа, таких как построение «Дерева неисправностей», позволяет выявлять потенциальные риски на этапе проектирования и производства, минимизируя вероятность сбоев. Только ответственный подход к каждому этапу изготовления гарантирует долговечность и безопасность готового изделия.

Список литературы

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. 528 с.

2. Кунафина А.О., Чертовских С.В. Современные способы изготовления жгутовых изделий радиоэлектронной аппаратуры // Материалы 51-й международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 80-летию девонской нефти / коллектив авторов. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2024. С. 943-947.

3. Кунафина А.О., Чертовских С.В. Совершенствование технологического процесса изготовления жгутовых изделий // Актуальные проблемы науки и техники – 2024: сб. материалов XVII Междунар. науч.- практ. конф. молодых ученых и специалистов (Уфа, 25–29 марта 2024 г.) / под общ. ред. д-ра техн. наук Ибрагимова И.Г. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2024. С. 298-300.

4. Кунафина А.О., Чертовских С.В. Особенности современного проектирования и изготовления жгутовых изделий // Материалы 75-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. В 2 т. / отв. ред. И.Г. Ибрагимов. Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2024. Т.1. С. 394.

5. Гелль П.П. Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд. 2018. 536 с.

6. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. М.: Высш. шк., 2000. 432 с.

7. Степаненко Н.Ю., Чертовских С.В., Лукьянов В.В., Астанин В.В. Технология изготовления защитной кромки для полимерных композитных изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 197-203.

8. Сибирякова С.О., Туманова Е.Ю. Надежность соединений труб с трубной решеткой // Актуальные проблемы науки и техники – 2024: сб. материалов XVII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов (Уфа, 25–29 марта 2024 г.) / под общ. ред. д-ра техн. наук Ибрагимова И.Г 2024. Уфа: УГНТУ, 2024. С. 372-374.

Кунафина Анна Олеговна, магистрант, akar99805@gmail.com, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Чертовских Сергей Владимирович, канд. техн. наук., доцент, зав. кафедрой, chertovskikh@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет

RELIABILITY OF ELECTRICAL HARNESSES OF GEOPHYSICAL INSTRUMENTS

A.O. Kunafina, S.V. Chertovskikh

The paper examines the reliability issues of electrical harnesses of geophysical instruments, identifies two main causes of failure: open circuit and short circuit, and forms a "fault tree" of harnesses during their production.

Key words: harness, geophysical instrument, electronic equipment, electronics.

Kunafina Anna Olegovna, master's, akar99805@gmail.com, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Chertovskikh Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, Head of the Department, chertovskikh@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University

УДК 658.58
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-461-462

ОБ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ СОПРОВОЖДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Э.М. Мусабиров, М.А. Бикмухаметова, С.В. Чертовских, А.В. Рубцов, Р.Э. Миргаязов

Представлена информационная система сопровождения технического обслуживания и ремонта на примере одного из технологических узлов нефтехимического предприятия, в рамках которой разработано клиент-серверное приложение на платформе Windows с возможностью редактирования и дополнения информации, поступающей в будущих запланированных ремонтах. Осуществлено формирование минимально необходимой ремонтной документации при проведении остановочного ремонта технологического узла.

Ключевые слова: цифровой ремонт, техническое обслуживание и ремонт, база данных, информационная система.

Информационные технологии активно внедряются во многие процессы различных отраслей промышленности, что значительно упрощает работу отдельных служб предприятия, экономит ресурсы, минимизирует производственные риски [1-5]. Не стали исключением процессы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) на предприятиях, занимающихся добычей, транспортировкой, переработкой и хранением углеводородного сырья.

В настоящее время на каждом предприятии топливно-энергетического комплекса существует информационная система (ИС) ТОиР, но в своем большинстве они не решают задачу по предоставлению полной информации по объекту ремонта [1, 6-10].

В работе представлена ИС сопровождения ТОиР, процесс создания которой проектировался на реально эксплуатируемом объекте на нефтехимическом предприятии. В качестве объекта исследования выбран технологический узел получения этилен-концентрата методом ректификации, который включает в себя 14 единиц оборудования, технологические трубопроводы, а также металлоконструкции.

При реализации остановочного ремонта нефтехимического предприятия необходимо учитывать огромное количество технической, нормативно-правовой, внутренней документации, включающей все этапы проведения ремонта технологических объектов, а именно: планирование, подготовку, ревизию, ремонт, а также испытания на плотность и прочность.

Этапу планирования следует уделять особое внимание при реализации ремонта. От планирования, с учетом рисков каждого этапа ремонта, напрямую зависит не только качество выполняемых работ в процессе ремонта, но и выполнение работ в срок, прибыль и безопасность предприятия в целом.

На данном этапе происходит формирование и учет требуемой технической документации. На большинстве предприятий, эксплуатирующих технологическое оборудование, она ведется в бумажном формате, который имеет значительные недостатки. Поэтому первым этапом цифровизации системы технического обслуживания и ремонта является переход на электронный учет технической документации.

Результатом комплексной работы является цифровой инструмент, представляющий клиент-серверное приложение, разработанное на основе операционной системы Windows с использованием таких программных продуктов, как: Microsoft SQL Server для создания базы данных, C# и Visual Studio для формирования программного кода [11, 12], и реализующее следующие возможности:

- визуализация технологического узла с использованием платформы для разработки игр Unity, а также тренажеров, относящихся к ремонту отдельных единиц оборудования;
- автоматическое формирование перечня оборудования с индивидуальными характеристиками;
- контроль сроков проведения остановочного ремонта каждой единицы оборудования;
- осуществление smart-поиска информации (характеристик, файлов, чертежей и др.) по ключевым словам;

- возможность сортировки и фильтрации информации и файлов;
- вывод на печать информации в требуемом объеме;
- информационная система документооборота, позволяющая формировать, хранить, передавать и редактировать информацию.

Приложение является .exe файлом, вход в который доступен только определенному кругу лиц, имеющих на это разрешение, а также имеющих собственную учетную запись с логином и паролем. Работа в программном комплексе производится за счет мощностей сервера. Может производится как при помощи локальной сети, так и удаленно, с компьютеров, имеющих доступ к сети интернет.

Наполнение базы данных является основным этапом для формирования правильной работы программного обеспечения. Обеспечение каждой единицы оборудования чертежами (рис. 1), монтажными схемами, спецификациями и другой необходимой документацией [13, 14] позволяет оперативно получать любую информацию по конструкции, комплектности и материальному исполнению оборудования и его узлов.

На основе данных моделей созданы виртуальные тренажеры (в игровом движке Unity) по вводу/выводу из эксплуатации технологического узла, отдельным ремонтным операциям технологического оборудования.

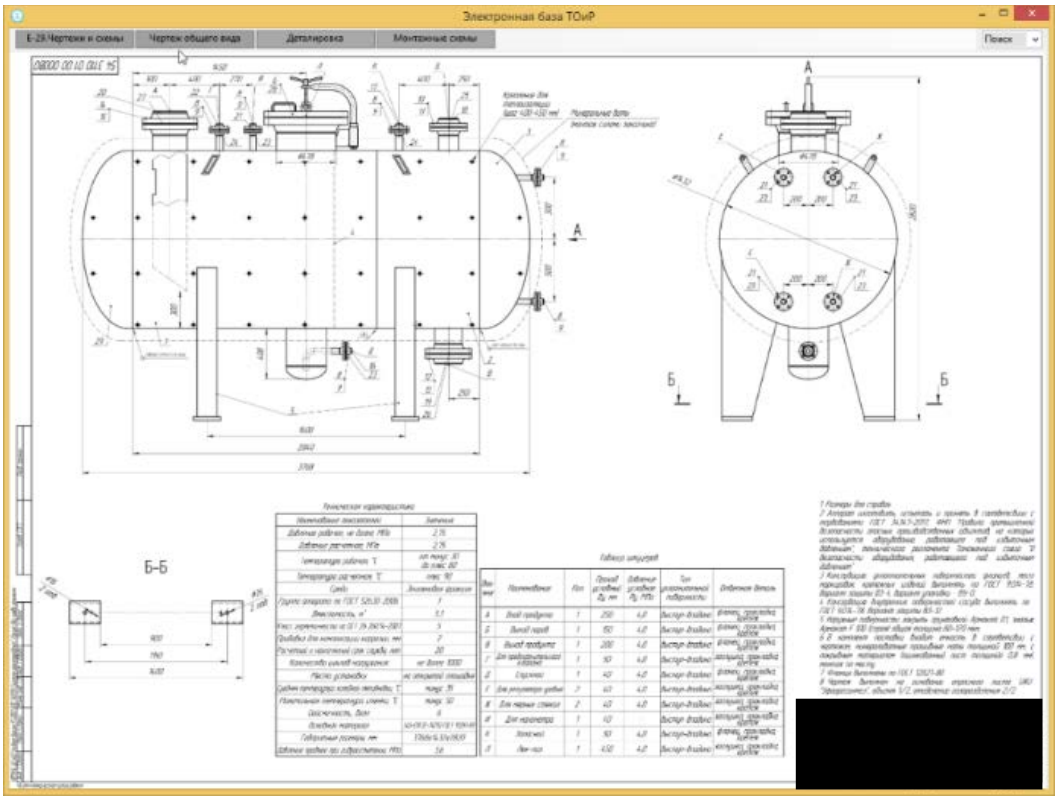


Рис. 1. Чертеж общего вида емкости

На рис. 2 представлена схема отглушения в 3D аппарата (дефлегматора), входящего в состав технологического узла.

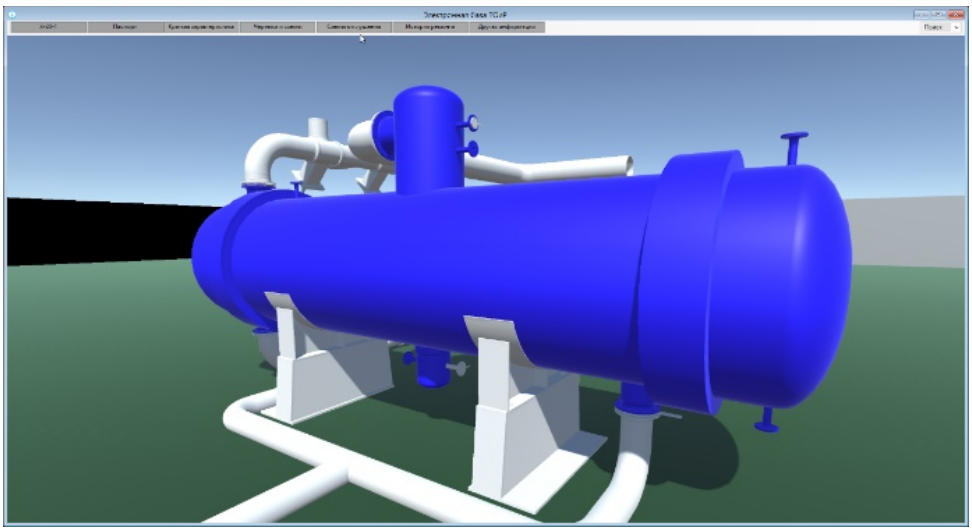


Рис. 2. Схема отглушения дефлегматора в 3D

Созданная 3D модель технологического узла получения этилен-концентрата в масштабе, представленная на рис. 3, послужила основой для создания дашборда, определяющего оптимальную последовательность и кратчайший путь отглушения оборудования, демонтажно-монтажных работ и решения других инженерных задач для данного узла при остановочном ремонте.



Рис. 3. 3D-модель технологического узла

На рис. 4 представлен дашборд отглушения технологического узла.

Необходимо отметить, что в разделе «РАБОЧАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ» представлена необходимая и достаточная документация для проведения остановочного ремонта технологического узла: план-график, перечни работ, а также дефектные ведомости. Начало формирования рабочей документации происходит на этапе планирования остановочного ремонта.

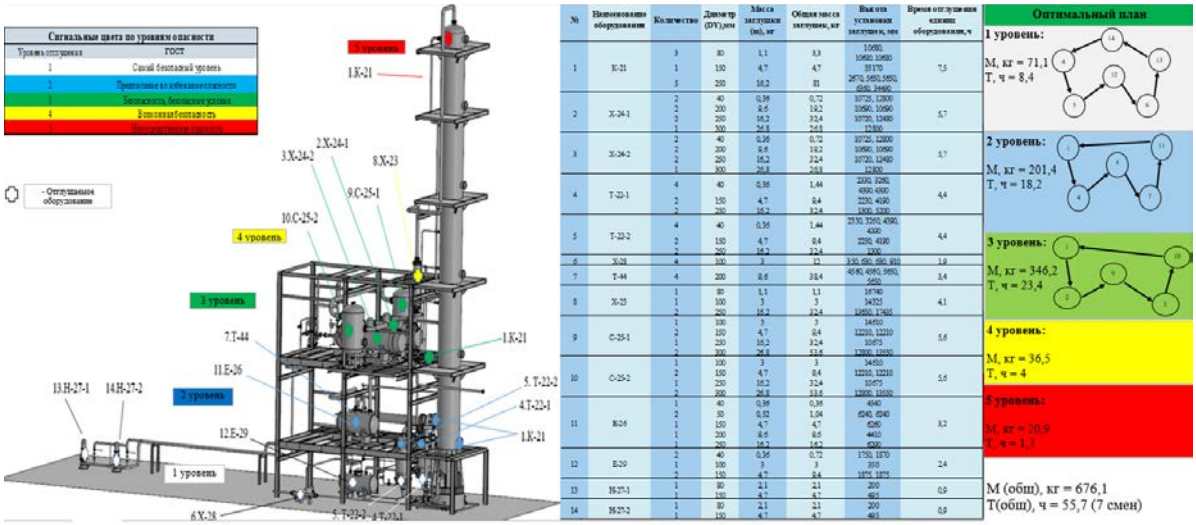
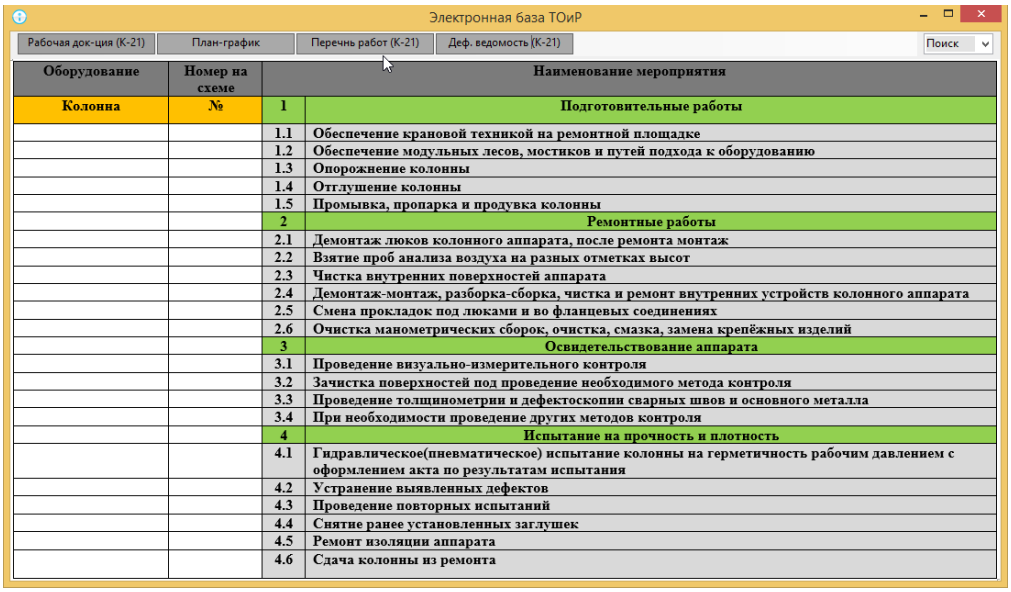


Рис. 4. Дашборд отглушения технологического узла

На рис. 5 представлен перечень работ, проводимых при остановочном ремонте колонного аппарата, входящего в состав технологического узла. Помимо наименования работ, в документе заложена необходимая информация, ресурсные характеристики для формирования дефектной ведомости.

Разработка базы данных, начальное наполнение информацией, разработка чертежей и 3D моделей является результатом проектной работы студентов выпускного курса бакалавриата по направлению 15.03.02 Технологические машины и оборудование (профили: Цифровые и сервисные технологии при эксплуатации нефтегазового

оборудования, Перспективные материалы и их диагностика в конструкциях), с последующей доработкой в магистратуре по данному направлению обучения, и реализуемой на кафедре «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета в рамках учебного плана.



Оборудование	Номер на схеме	Наименование мероприятия	
Колонна	№	1	Подготовительные работы
		1.1	Обеспечение крановой техникой на ремонтной площадке
		1.2	Обеспечение модульных лесов, мостиков и путей подхода к оборудованию
		1.3	Опорожнение колонны
		1.4	Отглушение колонны
		1.5	Промывка, пропарка и продувка колонны
		2	Ремонтные работы
		2.1	Демонтаж люков колонного аппарата, после ремонта монтаж
		2.2	Взятие проб анализа воздуха на разных отметках высот
		2.3	Чистка внутренних поверхностей аппарата
		2.4	Демонтаж-монтаж, разборка-сборка, чистка и ремонт внутренних устройств колонного аппарата
		2.5	Смена прокладок под люками и во фланцевых соединениях
		2.6	Очистка манометрических сборок, очистка, смазка, замена крепёжных изделий
		3	Освидетельствование аппарата
		3.1	Проведение визуально-измерительного контроля
		3.2	Зачистка поверхностей под проведение необходимого метода контроля
		3.3	Проведение толщинометрии и дефектоскопии сварных швов и основного металла
		3.4	При необходимости проведение других методов контроля
		4	Испытание на прочность и плотность
		4.1	Гидравлическое(пневматическое) испытание колонны на герметичность рабочим давлением с оформлением акта по результатам испытания
		4.2	Устранение выявленных дефектов
		4.3	Проведение повторных испытаний
		4.4	Снятие ранее установленных заглушек
		4.5	Ремонт изоляции аппарата
		4.6	Сдача колонны из ремонта

Рис. 5. Перечень работ для колонного аппарата

Отдельным достоинством интерактивного цифрового инструмента стало разработка дополнительного приложения, позволяющего отслеживать движение и хранить документацию предприятия в период планирования остановочного ремонта, анализировать и выявлять опасные факторы, влияющие на сроки проведения ремонта и качество его исполнения.

В ходе проектной деятельности помимо разработки и наполнения базы данных необходимой информацией для сопровождения остановочного ремонта технологического узла и создания 3D-моделей, была проведена работа по перемоделированию объекта под печать на 3D принтерах, после чего командой проекта была произведена его сборка с учетом общей геометрии и масштаба. Макет узла получения этилен-концентрата методом ректификации представлен на рис. 6, и активно используется в учебном процессе при изучении различных дисциплин на выпускающей кафедре.

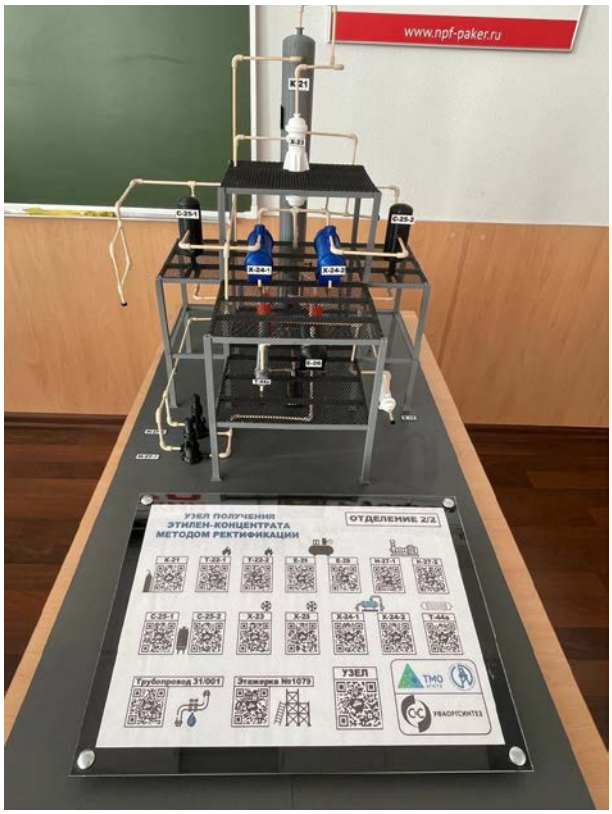


Рис. 6. Макет технологического узла получения этилен-концентрата методом ректификации

Возможность просмотра данных в электронном виде при помощи мобильного устройства реализована путем использования облачного хранилища, посредством перехода к нему сканированием QR-кода. Дополнительная установка программного обеспечения для просмотра информации не требуется. На каждый объект технологического узла создан свой индивидуальный QR-код, что дает возможность оперативно получить необходимую информацию по объекту ремонта.

Таким образом, разработанная ИС сопровождения ТОиР позволяет улучшить и упростить процесс ремонта и технического обслуживания на предприятии, повысить его безопасность, надёжность и культуру ведения документооборота.

Список литературы

1. Мусабиров Э.М., Бикмухаметова М.А. Разработка маршрутной карты ремонта технологического узла // Актуальные проблемы науки и техники − 2022: материалы Международная научно-практическая конференция молодых ученых. Уфа: УГНТУ, 2022. С. 169-171.
2. Габдуллин А.Р., Бикмухаметова М.А. Моделирование трубопроводной обвязки технологического узла // Актуальные проблемы науки и техники – 2022: материалы Международная научно-практическая конференция молодых учёных. Уфа: УГНТУ, 2022. С. 125-126.
3. Борщев Е.А., Бикмухаметова М.А. Технологии виртуальной и дополненной реальности в проекте «цифровой ремонт» // Актуальные проблемы науки и техники − 2023: материалы Международная научно-практическая конференция молодых ученых. Уфа: УГНТУ, 2023. С. 79-81.
4. Шустер Л.Ш., Чертовских С.В., Камалетдинова Р.Р. Новые информационные технологии в образовательном процессе // Фундаментальные основы инженерного образования в России: материалы национальной научно-практической конференции, посвященной 110-летию ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова. / под ред. Е.М. Дьяконова. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова, 2017. С. 97-103.
5. Габдуллин А.Р., Бикмухаметова М.А. Дашборд для проведения технического обслуживания и ремонта нефтегазового оборудования // Актуальные проблемы науки и техники − 2023: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых. Уфа: УГНТУ, 2023. С. 169-170.
6. Чертовских С.В. Внедрение новых информационных технологий в образовательный процесс // Актуальные вопросы высшего образования – 2022: материалы научно-методической конференции с международным участием. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. С. 49-53.
7. Мусабиров Э.М., Бикмухаметова М.А., Чертовских С.В. Информационная система сопровождения технического обслуживания и ремонта технологического оборудования нефтехимических предприятий // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2024: сборник трудов международной научно-технической конференции / коллектив авторов. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2024. С. 681-688.
8. Мусабиров Э.М., Бикмухаметова М.А. Цифровой инструмент сопровождения остановочных ремонтов нефтехимических предприятий // Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы: Материалы III Всероссийской молодежной научно-практической конференции; Оренбург. гос. ун-т. – Электрон. дан. – Оренбург: ОГУ, 2024.
9. Лукьянов А.Е., Пантюхин О.В. Методика контроля и прогнозирования выполнения ремонтных работ полигонного оборудования в местах базирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 93-95.
10. Постникова Е.С., Сидоров И.М., Яроцкая Н.А., Кошевой А.Р. Методы определения времени на техническое обслуживание и ремонт механообрабатывающего оборудования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 99-101.
11. Краткий обзор языка C#. [Электронный ресурс]. URL: https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/tour-of-csharp (дата обращения: 01.04.2024).
12. Основы работы с MSSQL. [Электронный ресурс]. URL: https://www.nic.ru/help/osnovy-raboty-s-mssql_11487.html (дата обращения: 01.04.2024).
13. ГОСТ 3.1102-2011. Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов. Общие положения [Электронный ресурс]. URL: https://meganorm.ru/Data/511/51112.pdf (дата обращения: 01.04.2024).
14. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200144954 (дата обращения: 01.04.2024).

Мусабиров Эмиль Маратович, аспирант, musabirov.emil.2000@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Бикмухаметова Марина Александровна, канд. экон. наук, доцент, maribik@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Чертовских Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, chertovskikh@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Рубцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук., доцент, sunset202@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Миргаязов Рамиль Эдуардович, магистрант, 4141145@list.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет

ABOUT THE INFORMATION SYSTEM FOR SUPPORTING TECHNICAL MAINTENANCE AND REPAIR OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF PETROCHEMICAL ENTERPRISES

E.M. Musabirov, M.A. Bikmukhametova, S.V. Chertovskikh, A.V. Rubtsov, R.E. Mirgayazov

An information system for technical maintenance and repair support is presented using the example of one of the process units of a petrochemical enterprise, within the framework of which a client-server application on the Windows platform was developed with the ability to edit and supplement information received in future planned repairs. The minimum necessary repair documentation was formed during the stop repair of a process unit.

Key words: digital repair; maintenance and repair; database; information system.

Musabirov Emil Maratovich, postgraduate, musabirov.emil.2000@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Bikmukhametova Marina Aleksandrovna, candidate of economical sciences, docent, maribik@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Chertovskikh Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, Head of the Department, chertovskikh@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Rubtsov Alexey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, sunset202@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Mirgayazov Ramil Eduardovich, postgraduate, 4141145@list.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University

УДК 62-586.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-466-467

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ ФОРМЫ ОТЛИВКИ ДЕТАЛЕЙ ВПУСКНОГО ТРАКТА НА МОЩНОСТЬ ДВС

Д.В. Окунев, М.А. Семашко, Э.Г. Балышева, С.В. Чертовских

В работе рассмотрены вопросы исследования влияния дефектов формы отливки деталей впускного тракта на мощность поршневого двигателя внутреннего сгорания. Проведённые исследования, моделирование и испытания позволили предложить способ, при помощи которого можно устранить возможные дефекты и восстановить мощность двигателя до расчётного.

Ключевые слова: газораспределительный механизм, поршневой двигатель внутреннего сгорания, впускной тракт, дефект формы, мощность двигателя, исследование, система автоматизированного проектирования.

Влияние системы газораспределительного механизма (ГРМ), в которую входит в том числе и впускной тракт, на мощность поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС) трудно переоценить. Так, двигатель ЗМЗ-21, объёмом 2,445 литра, имеет мощность 75 лошадиных сил (ЛС), двигатель ЗМЗ 402, отличающийся, только газо-воздушным трактом (ГВТ), имеет мощность 98 ЛС, а полностью переработанный, относительно своих предшественников, двигатель ЗМЗ-40620, объёмом 2,286 литра имеет 131 ЛС. Поэтому, создание мотора без исследований в области ГВТ и допустимых дефектов его изготовления, на сегодняшний день неприемлемо.

Для исследования газодинамики (на примере двигателя ЗМЗ 40620), а также расчёта некоторых параметров при использовании пакета прикладных программ (ППП) «Allbea» в системе автоматизированного проектирования (САПР) КОМПАС 3D была построена твердотельная модель впускного тракта. Размеры снимались с двух экземпляров впускных систем нового образца. На рисунке 1 представлена твердотельная модель впускного тракта.

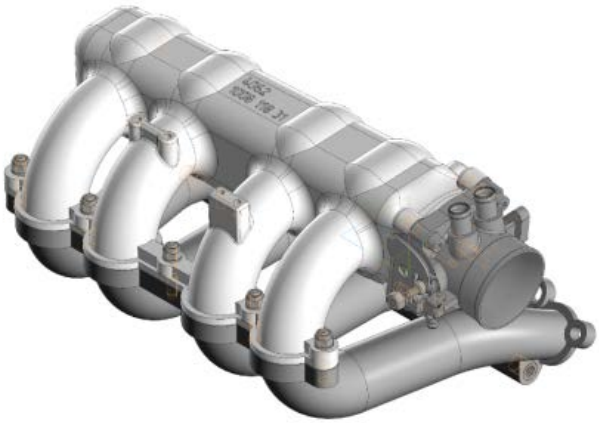


Рис. 1. Твердотельная модель впускного тракта

Для дроссельного патрубка, твердотельная модель которого представлена на рисунке 2, размеры снимались с детали 4062 1148 100 02 фирмы ПЕКАР.

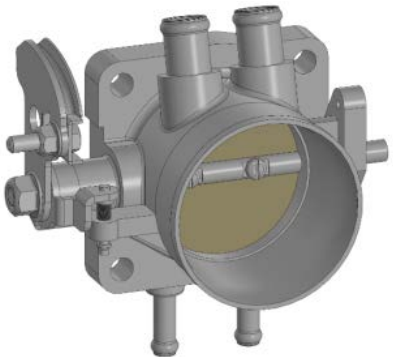


Рис. 2. Патрубок дроссельный

Размеры ресивера, твердотельная модель которого представлена на рисунке 3, снимались с детали 4062 1008 118 31.

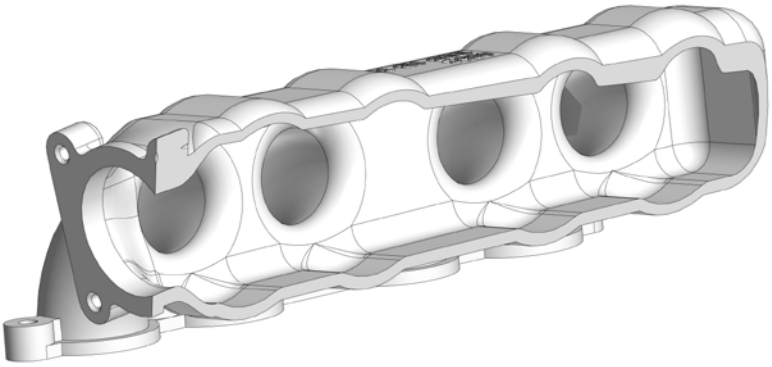


Рис. 3. Ресивер в разрезе

Размеры коллектора, твердотельная модель которого представлена на рисунке 4, снимались с детали 4062 10080 15 30.

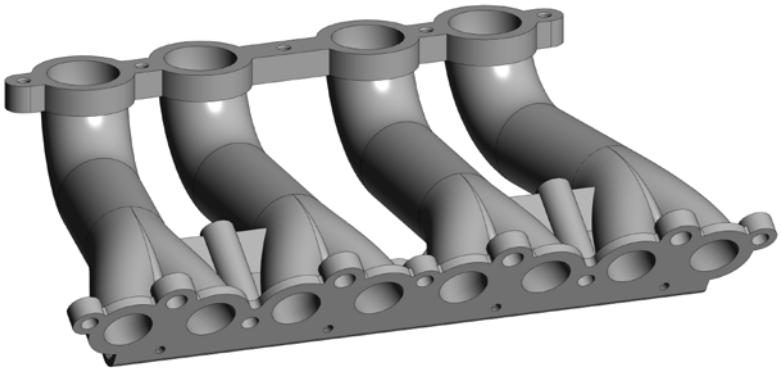


Рис. 4. Коллектор

Для исследования влияния наличия дефектов на течение газа использовалась САПР SolidWorks, так как для исследования газодинамики SolidWorks Flow Simulation более удобен в пользовании и имеет больше возможностей, чем Compass Flow. Модели из КОМПАС 3D в SolidWorks импортируются через формат STP AP242.

Кроме этого, для оценки влияния дефекта был использован коэффициент сохранения (восстановления) полного давления, равный отношению конечного давления к начальному.

$$\sigma = \frac{P_к}{P_н} \quad (1)$$

Электронный блок управления (ЭБУ) автомобиля каждый такт работы цилиндра рассчитывает массу воздуха, которая попадает в цилиндр во время такта впуска (далее цикловой расход воздуха *Gbc*) и массовый расход воздуха (*MPB* или *G*) относительно этой величины, однако из-за того, что расход воздуха во время такта впуска неравномерный, значение *G* будет занижено. В связи с этим, для построения функциональной зависимости *G* от времени *t*, которая будет обладать допустимой точностью для расчёта газодинамики в Solid Works, в ППП для численного моделирования процессов в ДВС «Allbea» была построена модель исследуемого двигателя по известным размерам и параметрам, в том числе и взятых с построенной твердотельной модели в КОМПАС 3D. Для сравнения на рисунке 5 приведены две внешние скоростные характеристики (ВСХ), одна рассчитана в «Allbea», вторая измерена с реального двигателя заводом-изготовителем.

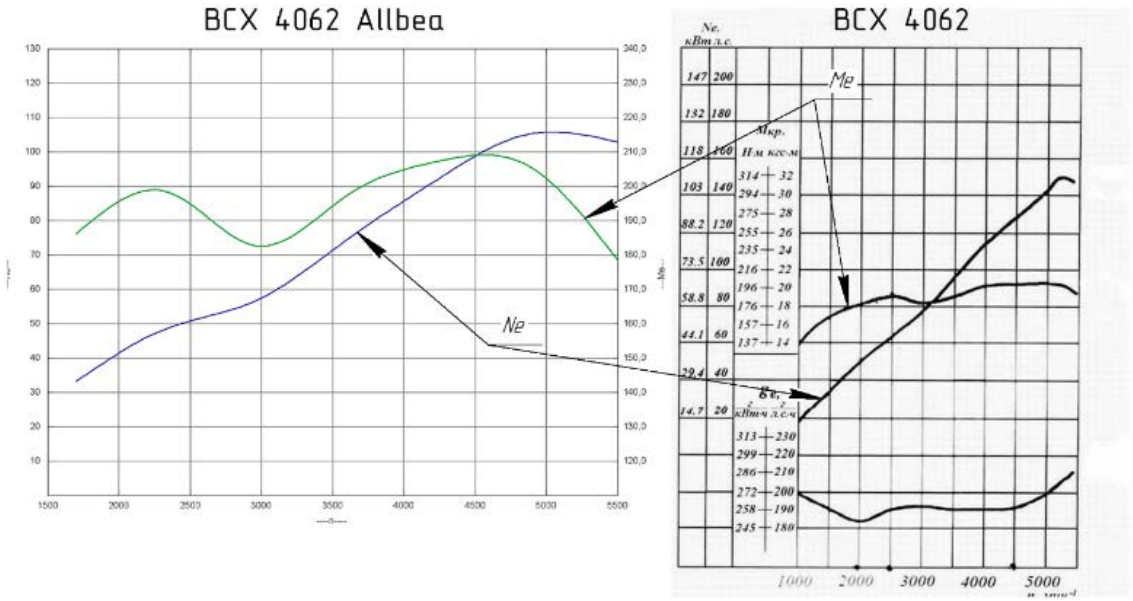


Рис. 5. Сравнение ВСХ

Так как две ВСХ с немалой точностью сходятся, то данную модель можно использовать для снятия тех параметров, которые невозможно измерить с реального двигателя, например, точный расход воздуха в зависимости от угла поворота коленчатого вала, а также оценивать изменения крутящего момента при внесении изменений в ГВТ.

В результате расчёта при заданной частоте вращения n = 5500 об/мин был построен график массы воздуха в цилиндре и расхода воздуха сквозь впускные клапаны, показанный на рисунке 6.

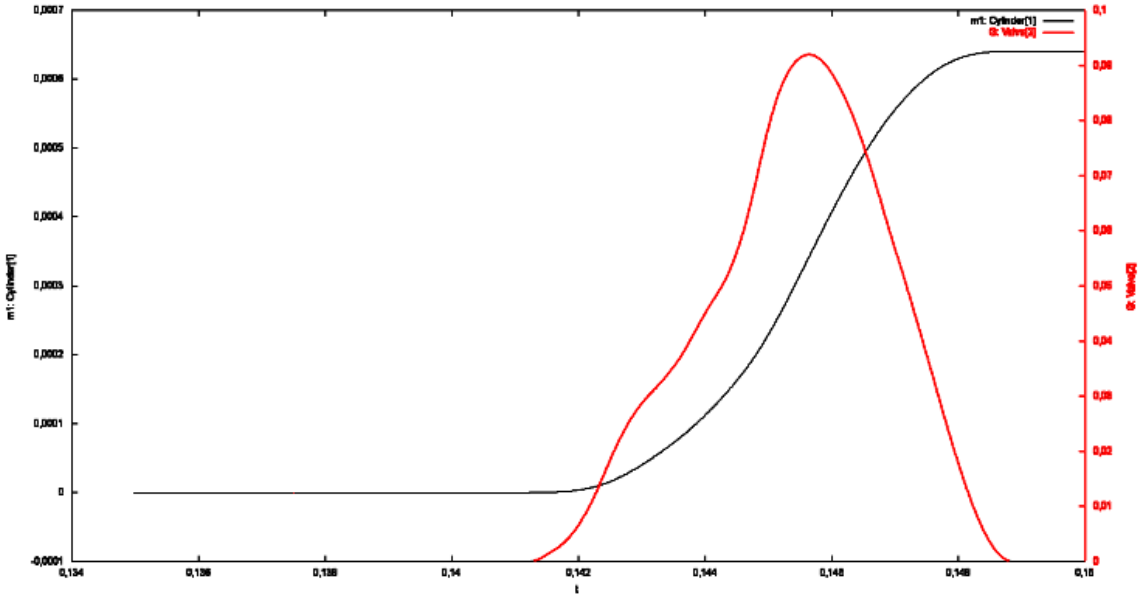


Рис. 6. График расхода воздуха и массы воздуха в цилиндре

В результате, при *Gbc* = 0,625 гр/ц и среднем расходе воздуха $G_{ср} = Gbc \cdot 2 \cdot n \cdot 60 = 412500$ грамм/час или же 412,5 кг/ч, а максимальный расход воздуха на клапане 0,09 кг/с, т.е. 0,18 кг/с на двух впускных клапанах, или же 648 кг/ч, что в 1,57 раза больше чем средний.

Для определения общего влияния дефектов на мощность и крутящий момент ДВС, построим таблицу зависимости σ от числа Маха *M* для каждого дефекта геометрии, после чего в модель двигателя в «Allbea» внесём местные сопротивления, представляющие в данном случае модель дефектов, имеющие характеристики, полученные в Solidworks.

Применение в производстве литья в одноразовые песчаные формы приводит к образованию дефектов деталей, так как для этого способа характерна невысокая точность изготовления [1-7]. При измерении деталей ГВТ были выявлены дефекты геометрии, в виде несовпадения фланцев деталей и разных размеров отверстий каналов во фланцах, образующих ступеньки, пагубно влияющие на процессы газообмена в ДВС. Пример несовпадения фланцев деталей показан на рисунке 7.

В данном случае ступенька имеет максимальную ширину 3 мм, однако её размер может изменяться не только от изделия к изделию, но также и в одном изделии на разных каналах. На рисунке 8 показан результат исследования поверхности без «дефекта ступеньки», на рисунке 9 с дефектом.



Рис. 7. Ступенька в канале на месте стыка впускного коллектора и ресивера

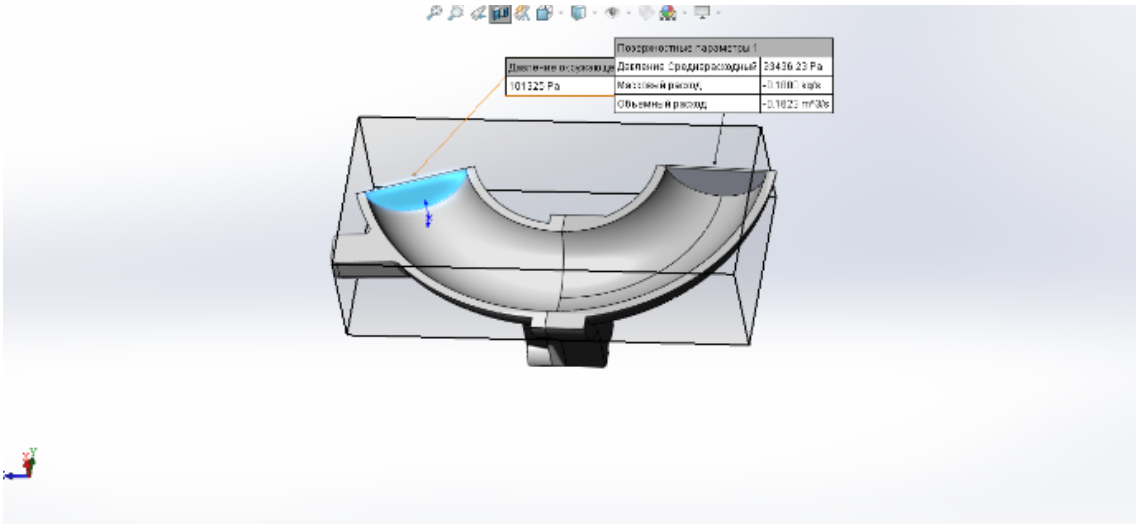


Рис. 8. Исследование без дефекта

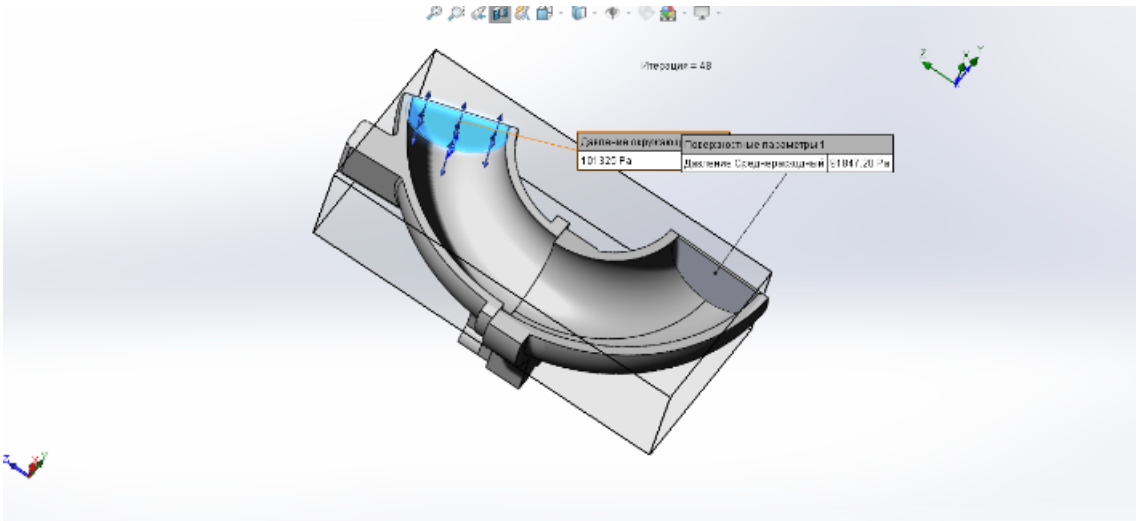


Рис. 9. Исследование с дефектом

Результаты исследований в SolidWorks:
С дефектом σ = 91847 / 101325 = 0,906.
Без дефекта σ = 93436 / 101325 = 0,9222.
Разница между двумя случаями равна 1,8%.
Пример дефекта разных диаметров отверстий каналов на фланцах показан на рисунке 10 и 11.



Рис. 10. Ступенька на стыке впускного коллектора и головки блока цилиндров (ГБЦ) (отмечено красным цветом)



Рис. 11. Ответная часть в ГБЦ

На рис. 12 показан результат исследования поверхности без «дефекта ступеньки», на рис. 13 с дефектом.

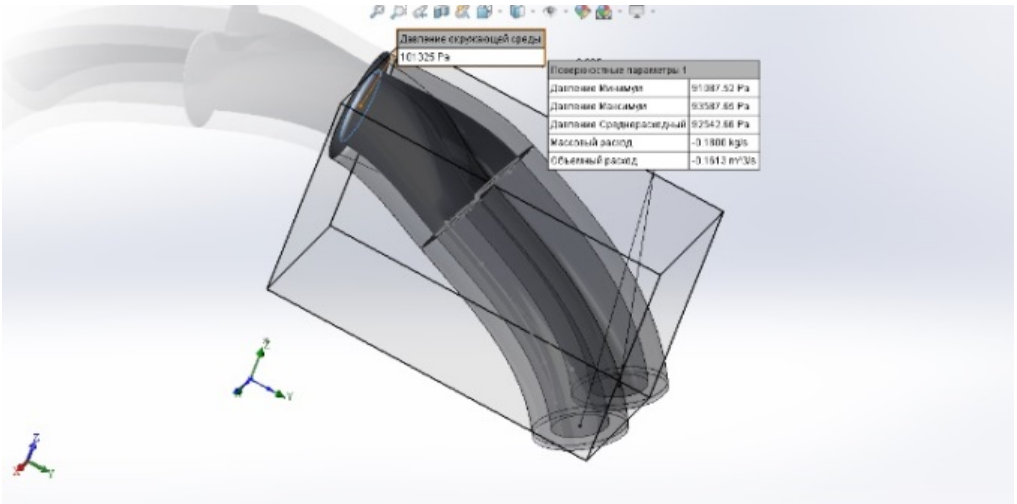


Рис. 12. Исследование без дефекта

Результаты исследований в SolidWorks:
С дефектом σ = 91324 / 101325 = 0,9012.
Без дефекта σ = 93587 / 101325 = 0,9236.

Разница между двумя случаями равна 2,485%.

Дефекты геометрии также влияют и на нестационарные газодинамические эффекты. Во время открытия впускного клапана, в силу разницы давления в цилиндре и давления перед клапаном, образуется волна разряжения, которая будет двигаться по трубопроводу в сторону открытого конца трубопровода (выход к ресиверу), на открытом срезе трубы волна разряжения отразится в волну сжатия и пойдёт в противоположную сторону. Если оптимально подобрать сечения каналов и клапанов, длину трубопровода и время открытия клапанов можно получить больше мощности за счёт того, что в момент открытия клапана волна сжатия дополнительно дозарядит цилиндр новой порцией воздуха.

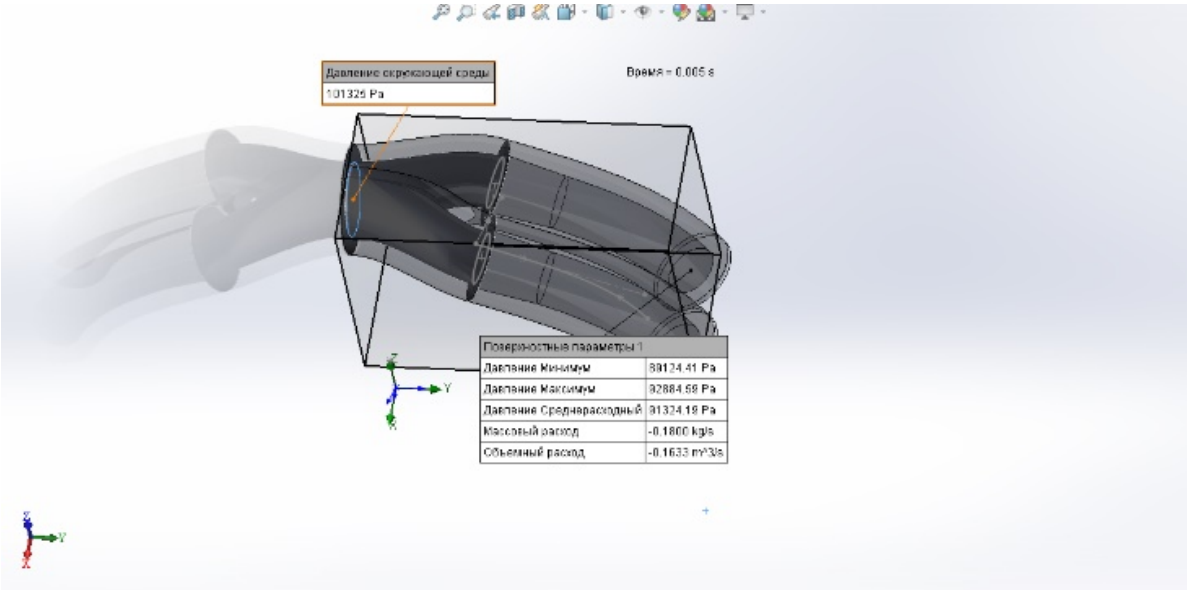


Рис. 13. Исследование с дефектом

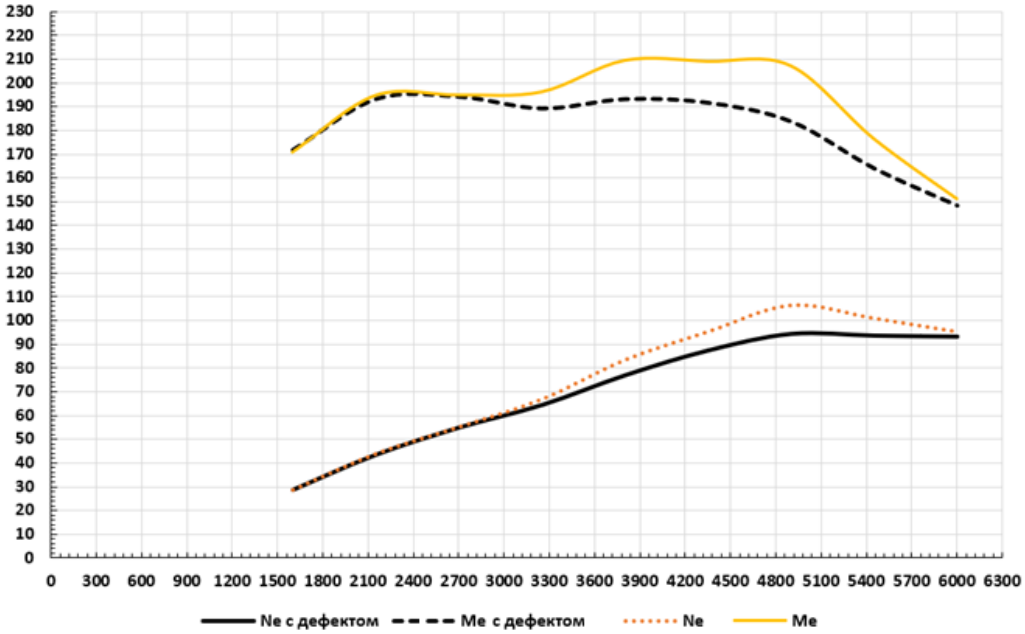


Рис. 14. Сравнение ВСХ, полученные в ППП «Allbea», с дефектом и без дефекта

При прохождении изменения сечения, чем и являются вышеописанные дефекты, волна будет делиться на две части: отражённую и прошедшую. Но в случае резкого изменения сечения суммарная энергия всех волн будет ощутимо ниже изначальной волны. В случае, когда по ГВТ идёт волна разряжения, если сечение уменьшается, то отражённая волна будет волной разряжения, ровно, как и прошедшая, а в случае, когда сечение увеличивается, то отраженная волна станет волной сжатия. В случае, когда по ГВТ идёт волна сжатия, если сечение уменьшается, то отражённая волна будет волной сжатия, а в случае, когда сечение увеличивается, то отраженная волна станет волной разряжения.

Кроме этого, данные дополнительные волны могут негативно влиять на процессы газообмена, так как ГВТ, скорее всего, просчитывался без учёта данных ступенек, образующие дополнительные волны. Образование дополнительных волн ведёт к ослаблению основной волны, что приводит к ослаблению эффекта дозарядки цилиндра дополнительным воздухом, как следствие, понижение наполнения цилиндра воздухом и понижение мощности [8, 9].

Для полного описания и расчёта влияния дефектов на процесс газообмена и мощность требуется целая система математических моделей разных элементов ГВТ, поэтому рационально будет использовать систему компьютерного моделирования, например ППП «Allbea». В модели базового двигателя некоторые каналы ГВТ были разделены на 2 части и отредактированы для геометрического задания дефектов формы (на конце каналов были добавлены сужения). Между каналами были вставлены модели связи «Местное сопротивление», в которых были заданы данные по характеристике сопротивления, полученных в SolidWorks. Всего в базовую модель было внесено 25 дополнительных элементов. Результат моделирования представлен на рисунке 14.

По графикам (рисунок 14), полученным в ППП «Allbea» можно увидеть, что до частоты вращения коленчатого вала, равной 3100 об/мин изменения крутящего момента (*Me* и *Me* с дефектом), равно как и мощности (*Ne* и *Ne* с дефектом), незначительны, однако, с повышением частоты вращения разница мощности между *Ne* и *Ne* с дефектом становится существеннее. При частоте вращения, на которой достигается максимальная мощность (5150 об/мин), ДВС без дефектов выдает 107 кВт, тогда как ДВС с дефектами – 94,6 кВт. ДВС без дефектов мощнее ДВС с дефектами на 13%.

Результаты проведённых исследований позволяют предложить следующие методы исправления вышеуказанных дефектов:

1) заводу изготовителю следует принять меры по улучшению качества продукции. Необходимо ужесточить требования технического контроля для увеличения точности и качества изготовления песчаных форм отливки, что приведёт к улучшению качества изготовленных деталей;

2) интересным решением может быть внедрение альтернативной технологии изготовления впускного коллектора, которая позволяет избежать образования дефектов: впускной коллектор отливается не единой деталью, а несколькими частями из пластмассы, которые склеиваются специальным адгезивом [11]. Такая технология позволяет использовать литьё в многоразовые металлические формы, что позволяет добиться одинаковой формы разных деталей и их качественной поверхности [1-3]. Также использование пластмассы ведёт к понижению температуры впускного воздуха, так как полиамид, как и другие виды пластика, обладает меньшим коэффициентом теплопроводности, что ведёт к повышению плотности всасываемого в цилиндры воздуха, и как следствие – дополнительное повышение мощности;

3) можно самостоятельно устранить дефекты впускного коллектора на личном автомобиле. Схема исправления дефектов показана на рисунке 15.

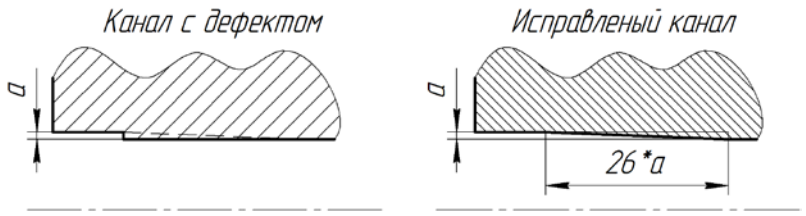


Рис. 15. Схема исправления канала

После проведённого моделирования в САПР SolidWorks было предложено заменить ступеньку в канале высотой 1 мм фаской с длиной большего катета 26 мм. Реализовать это можно при помощи шлифовальной насадки на дрель вместе с удлинителем, границы ступенек определять по рельефу, который оставляют острые края каналов на герметизирующей прокладке, либо по контуру прокладки. В результате снижение конечного давления будет близко к идеальному каналу без дефекта. Даже если изменение сечения будет приводить к разделению основной волны на прошедшую и отраженную, то их суммарная энергия будет близка к энергии начальной волны, в отличие от перехода с резким изменением сечения.

Для реализации результатов исследования были проведены натурные испытания. По данным из различных источников (Auto.ru; Avito) разгон до скорости 100 км/ч у испытуемого автомобиля (ГАЗ-310200, двигатель 40620, рабочий объём 2,3 литра, мощность 131 ЛС) составляет 13,5 секунд.

Для извлечения данных из ЭБУ был использован программный комплекс *MOLT (Mikas On-Line Tuner*), который, в отличие от аналогов, позволяет производить опрос данных. Вследствие программных особенностей ЭБУ, график датчика скорости автомобиля даёт численно не дифференцируемую табличную функцию, а при аппроксимации погрешности растут до недопустимых значений, поэтому анализ мощности будет производиться по времени разгона.

Для решения данной задачи был написан специализированный макрос в *Excel*, который позволяет рассчитать время разгона автомобиля по прямому участку, в качестве исходных данных имея мощность двигателя, параметры кузова, колёс и трансмиссии, а также время, уходящее на переключение на более высокую передачу и частоту вращения коленчатого вала ДВС, на которой происходит переключение передачи.

В расчёте учитываются:

- мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха;
- мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению колёс;
- мощность, затрачиваемая на угловое ускорение элементов трансмиссии и колёс;
- мощность, затрачиваемая на придание ускорения кузову;
- коэффициент полезного действия трансмиссии.

Расчёт ведётся по следующему алгоритму:

1) расчёт частоты вращения коленчатого вала, имея начальную скорость, при помощи передаточных отношений трансмиссии и радиуса колеса;

2) расчёт мощности, выдаваемой ДВС при помощи заранее заданной функции, в зависимости от частоты вращения коленчатого вала;

3) расчёт мощности, затрачиваемой на придание ускорения кузову автомобиля и расчёт ускорения кузова автомобиля;

4) численное интегрирование ускорения для получения приращения скорости за один цикл расчёта и последующий расчёт скорости для следующего цикла;

5) повторение шагов 1-4 до получения нужного результата.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха, рассчитывается по формуле:

$$N_a = F_a * v = \frac{C_x * S * \rho}{2} * v^3, \quad (2)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления; S – Миделево сечение кузова; ρ – плотность воздуха; v – скорость автомобиля.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению колёс, рассчитывается по формуле:

$$N_c = F_c * v = f_v * m * g * v, \quad (3)$$

где $f_v = f_0 * \left(1 + \frac{v^2}{1500}\right)$; f_0 – базовый коэффициент сопротивления качению; m – масса автомобиля; g – ускорение свободного падения; v – скорость автомобиля.

Мощность, затрачиваемая на придание ускорения кузову, рассчитывается по формуле:

$$N_{av} = mav, \quad (4)$$

где m – масса автомобиля; a – ускорение автомобиля; v – скорость автомобиля.

С мощностью, затрачиваемой на угловое ускорение элементов трансмиссии и колёс, будет сложнее, существует готовая формула, которая следует из уравнения динамики вращательного движения. Однако, из-за специфики расчёта применить эту формулу получится только на втором цикле расчётов, как следствие – волнообразные отклонения ускорения в течение первых циклов. Поэтому, необходимо видоизменить уравнение динамики вращательного движения, чтобы получилось уравнение динамики материальной точки.

В первую очередь, выведем формулу для сложения моментов инерции нескольких валов, соединённых колёсами, с условием отсутствия проскальзывания двух колёс друг относительно друга.

Возьмём два вала (рисунок 16), с моментами инерции J_1 и J_2, соединённых колёсами с радиусами R_1 и R_2.

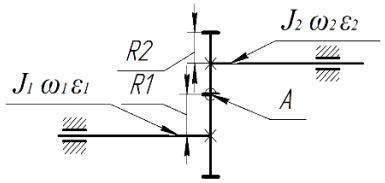


Рис. 16. Схема соединения валов

Найдём угловую скорость второго вала:

$$\omega_1 R_1 = v_a = \omega_2 R_2$$

$$\omega_2 = \frac{R_1}{R_2} * \omega_1, \quad (5)$$

где ω_1 – угловая скорость первого вала; R_1 и R_2 – радиусы соответствующих колёс.

Найдём угловое ускорение второго вала:

$$\varepsilon_2 = \dot{\omega}_2 = \frac{R_1}{R_2} * \dot{\omega}_1 = \frac{R_1}{R_2} * \varepsilon_1, \quad (6)$$

где ε_1 – угловое ускорение первого вала; R_1 и R_2 – радиусы соответствующих колёс.

Найдём крутящий момент, требуемый для ускорения двух валов и разделим на угловое ускорение первого вала:

$$J = \frac{M_1 + M_2}{\varepsilon_1} = \frac{J_1 * \varepsilon_1 + J_2 * \frac{R_1}{R_2} * \varepsilon_1}{\varepsilon_1} = J_1 + \frac{R_1}{R_2} * J_2, \quad (7)$$

где J_1 – момент инерции первого вала; J_2 – момент инерции второго вала; R_1 и R_2 – радиусы соответствующих колёс.

Разделим угловую скорость второго вала на скорость первого вала и сравним с отношением радиуса первого колеса к радиусу второго:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\frac{R_1}{R_2} * \omega_1}{\omega_1} = \frac{R_1}{R_2} = K_{\text{п}}, \quad (8)$$

тогда, обобщим итоговую формулу суммы моментов инерции n валов, вращающихся с зависимыми скоростями:

$$J = K_{\text{п}1} * J_1 + K_{\text{п}2} * J_2 + \cdots + K_{\text{п}n} * J_n, \quad (9)$$

где $K_{пn}$ – отношение угловой скорости n–ого вала к угловой скорости первого вала; $J_1 \ldots J_n$ – моменты инерции соответствующих валов.

Так как КПП (коробка переключения передач) при переключении передач изменяет передаточное отношение, то мысленно проведём декомпозицию трансмиссии на 2 системы:

– жестко и постоянно связанную с маховиком ДВС (в случае ГАЗ-3102: шестерни передач, промежуточный вал КПП, первичный вал КПП, диск сцепления и корзина сцепления);

– связанную с колесом (4 колеса, полуоси, редуктор моста с дифференциалом, карданный вал и вторичный вал КПП), и найдем момент инерции системы валов J_n (связанную с маховиком) и J_v (связанную с колесом).

Во время расчёта, в зависимости от выбранной передачи КПП, два момента инерции J_n и J_v будут суммироваться по формуле:

$$J_c = J_v + J_n * \frac{\frac{2\pi * n_{\text{кв}}}{60}}{\frac{v}{R_{\text{к}}}} = J_v + J_n * \frac{\pi * n_{\text{кв}} * R_{\text{к}}}{30v}, \quad (10)$$

где J_v – момент инерции системы валов, связанной с колесом; J_n – момент инерции системы валов, связанной с маховиком; $n_{кв}$ – частота вращения коленчатого вала, об/мин; $R_к$ – радиус колеса; v – скорость автомобиля.

Для того, чтобы видоизменить уравнение динамики вращательного движения на уравнение динамики материальной точки, запишем уравнение для системы валов трансмиссии. Выразим угловое ускорение и скорость через скорость точки на окружности колеса, т.е. скорость и ускорение автомобиля, после чего выразим отдельно скорость и ускорение:

$$\omega = \frac{v}{R_к} \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{a}{R_к} \quad (12)$$

$$N_\omega = J_c \varepsilon \omega = J_c * \frac{v}{R_к} * \frac{a}{R_к} = \frac{J_c}{R_к^2} * v * a, \quad (13)$$

где N_ω – мощность, затрачиваемая на угловое ускорение валов трансмиссии; J_c – общий момент инерции системы (момент инерции всех колёс + моменты инерции всех валов трансмиссии (полуоси, карданный, вал и пр.); $R_к$ – радиус колеса; v – скорость автомобиля; a – ускорение автомобиля.

Получаем уравнение мощности:

$$\frac{N_{двс}}{n_т} = N_a + N_c + N_{av} + N_\omega \quad (14)$$

$$\frac{N_{двс}}{n_т} = \frac{C_x S \rho}{2} v^3 + f_v m g v + m a v + m_д a v \quad (15)$$

Поскольку в расчёте необходимо решить обратную задачу, преобразуем формулу:

$$a = \frac{\frac{N_{двс}}{n_т} - \frac{C_x S \rho}{2} v^3 - f_v m g v}{v(m + m_д)}, \quad (16)$$

где n_t – КПД трансмиссии.

Из данных, полученных в ППП «Allbea», строим зависимости мощности от частоты вращения коленчатого вала и рассчитываем время разгона автомобиля. В результате расчёта, время разгона на ДВС без дефекта составило 12,59 секунд, на ДВС с дефектом 13,75 секунд. Возможно, время разгона на стандартном двигателе получилось меньше из-за большей массы конкретного автомобиля. По результатам нескольких замеров, время разгона автомобиля составило 12,54 секунды, что подтверждает рост мощности на 13%.

Таким образом, дефекты изготовления в виде несовпадения фланцев или разной формы каналов понижают крутящий момент преимущественно на высокой частоте вращения коленчатого вала. В случае двигателя ЗМЗ 40620 падение мощности составляет 13%. Проведённые исследования, моделирование и испытания позволили предложить способ, при помощи которого можно устранить дефекты впускного коллектора и восстановить мощность двигателя до расчётного.

Список литературы

1. Александров В.Д., Безрук В.Б., Морщилов М.В. Основные способы литья: учебно-методическое пособие к лабораторно-практической работе. М.: МАДИ, 2021. 40 с.

2. Трухов А.П., Сорокин Ю.А., Ершов М.Ю., Благонравов Б.П., Минаев А.А., Гини Э.Ч. Технология литейного производства. Литье в песчаные формы. Москва, 2005. Издательство: Издательство Академия. 528 с.

3. Никитин К.В., Соколов А.В., Никитин В.И., Дьячков В.Н. Инновации в литье по выплавляемым моделям. Самара, 2017. Издательство: Самарский научный центр РАН. 144 с.

4. Семенов В.И., Чертовских С.В. Триботехнические характеристики низкоуглеродистой стали после термической обработки и интенсивной пластической деформации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 534-541.

5. Камалетдинова Р.Р., Мамлеев Р.Ф., Мамлеев Р.Ф., Чертовских С.В., Шустер Л.Ш. Вопросы применения керметов на основе карбида титана в трубопроводной запорной арматуре // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 2 (110). С. 3-6.

6. Чертовских С.В. Подбор материалов трибосопряжений запорной трубопроводной арматуры с учетом исследования адгезионных параметров трения / С.В. Чертовских, И.Р. Горлова, Л.П. Худякова, М.А. Семашко // Инновации и наукоемкие технологии в образовании и экономике: материалы X Международной научно-практической и методической конференции (г. Уфа, 26-27 мая 2022 г.) / отв. редактор К.Ш. Ямалетдинова. Уфа: РИЦ БашГУ, 2022. С. 131-138.

7. Степаненко Н.Ю., Чертовских С.В., Лукьянов В.В., Астанин В.В. Технология изготовления защитной кромки для полимерных композитных изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 197-203.

8. Черноусов А.А. Нестационарные газодинамические эффекты в ДВС: конспект лекций. Уфа: УГАТУ, 2021, 42с.

9. Чертовских С.В. Перспективы эксплуатации транспортных средств на водородных топливных элементах / С.В. Чертовских, Э.Г. Балышева, М.А. Гамага, К.А. Савчуков, Р.Я. Абдюкова // Актуальные вопросы высшего образования – 2022: материалы научно-методической конференции с международным участием. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. С. 113-116.

10. Патент RU2357096C2. Способ изготовления впускного коллектора автомобильного двигателя.

11. Зенкин В.А., Гришин Ю.А. Настройка впускной системы поршневого двигателя. Москва, 2021. Издательство: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 32 с.

12. Шустер Л.Ш. Антифрикционный высокотемпературный смазочный материал, образующий защитное покрытие / Л.Ш. Шустер, Р.Г. Нигматуллин, С.В. Чертовских, Д.Г. Тюленев, И.М. Нигматуллин // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 5. С. 22-24.

Окунев Денис Владиславович, студент, ufimsky.d@yandex.ru, Россия, Уфа, Уфимский университет науки и технологий,

Семашко Мария Андреевна, старший преподаватель, semashkoma@yandex.ru, Россия, Уфа, Уфимский университет науки и технологий,

Балышева Элина Генриховна, старший преподаватель, elinkos@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский университет науки и технологий,

Чертовских Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, chertovskikh@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет

STUDY OF THE INFLUENCE OF CASTING SHAPE DEFECTS OF INTAKE TRAFFIC PARTS ON THE POWER OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

D.V. Okunev, M.A. Semashko, E.G. Balysheva, S.V. Chertovskikh

The paper examines the issues of studying the influence of casting shape defects of intake tract parts on the power of a piston internal combustion engine. The conducted research, modeling and testing allowed us to propose a method by which possible defects can be eliminated and engine power restored to the calculated value.

Key words: valve timing mechanism, piston internal combustion engine, intake tract, shape defect, engine power, research, computer-aided design system.

Okunev Denis Vladislavovich, student, ufimsky.d@yandex.ru, Russia, Ufa, Ufa University of Science and Technology,

Semashko Maria Andreevna, senior lecturer, semashkoma@yandex.ru, Russia, Ufa, Ufa University of Science and Technology,

Balysheva Elina Genrikhovna, senior lecturer, elinkos@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa University of Science and Technology,

Chertovskikh Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, Head of the Department, chertovskikh@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University

УДК 621.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-475-476

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЖГУТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

С.В. Чертовских, А.О. Кунафина, А.В. Рубцов, М.В. Демченко, И.Р. Хакимова

В работе рассмотрены вопросы совершенствования технологии изготовления жгутовых изделий радиоэлектронной аппаратуры: использование современных САПР при 3D-моделировании, разработки конструкторской и технологической документации; внедрение автоматизированных линии на этапах производственного цикла; применение интерактивного помощника.

Ключевые слова: жгут, жгутовые изделия, составные элементы, электротехника.

Жгутовые сборки – неотъемлемая часть современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Жгутом (рис. 1) в электротехнике называют конструкцию из двух и более изолированных проводов, скрепленных в пучок связыванием (ниткой, лентой) или каким-либо другим способом, и предназначен для электрической связи между элементами аппарата, прибора или устройства. Серия проводных элементов, идущих в одном направлении и расположенных рядом на одном пути, связанных или объединенных вместе, заканчиваются на подключениях к различным элементам электрических схем. Несмотря на уменьшение выводного монтажа, переход на поверхностно-монтируемые изделия, создание современных интегральных микросхем и появление новой компонентной базы, очевидно, что в перспективе ближайших десятилетий не будет альтернативы проводным соединениям. А современные тенденции развития предъявляют к жгутовым сборкам новые требования.

Использование электронного оборудования широко распространено в современных отраслях промышленности [1], играя важнейшую роль как в разработке, так и в производстве сложной продукции. Жгуты нашли применение в медицинской технике, авиакосмической отрасли, военной промышленности, машиностроении, в том числе автомобилестроении, судостроении, железнодорожном оборудовании. При этом категоризация жгутов соответствует современным требованиям в каждой области. По способу применения жгуты делятся на две группы: внутриблочные (служат для электрического соединения отдельных узлов, блоков и электрических деталей внутри прибора) и межблочные (применяются для электрического соединения различной РЭА и приборов в одну систему).

Несмотря на развитие автоматизации производства, сборка жгутов зачастую осуществляется с применением ручных инструментов, что обусловлено спецификой определенных изделий. Очевидно, что при ручной обработке не приходится говорить о высокой скорости процесса и производительности. Совершенствование технологии производства жгутовых изделий РЭА необходимо начать с этапа разработки конструкции изделий. Также важно учитывать материалы, которые применяются в процессе производства, так как это влияет на технологичность и качество продукта на данном этапе. Несмотря на внедрение новых материалов, при разработке жгутовой продукции зачастую используют в конструкции устаревшие проводные материалы [2], что связано с игнорированием необходимости учитывать изменения рынка, направленные на повышение качества и технологичности. Есть несколько факторов, объясняющих это. Во-первых, информация о последних технологических достижениях не всегда своевременно поступает в конструкторские отделы производств. Во-вторых, большие организационные затраты на проведение изменений и их согласование с конечными заказчиками, а также обилие нормативных документов делают внедрение новых компонентов в процесс разработки и производства трудоемкими и времязатратными.

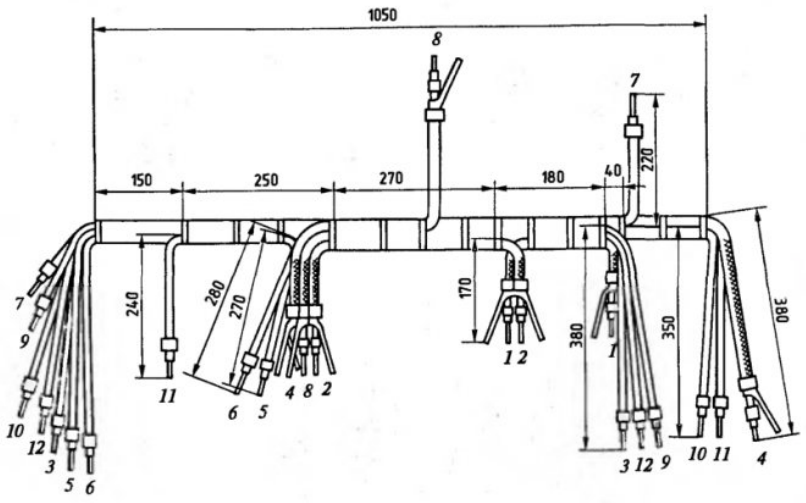


Рис. 1. Жгут

Для повышения качества выпускаемой продукции и снижения влияние человеческого фактора внедряют автоматизированные линии и используют современные технологии на всех этапах производственного цикла. На первом этапе создания жгутов происходит разработка всего процесса, чтобы избежать необходимости внесения изменений и задержек в последующих этапах производства. С помощью современных САПР конструкторы могут сократить время разработки конструкторской и технологической документации, выполняя 3D-моделирование расположение жгута в изделии, быстро модифицируя конструкцию и контролируя весь жизненный цикл изделия от эскиза до финального контрольного стенда [3]. Использование системы отслеживания в новом производственном процессе существенно уменьшает время идентификации проводов и в том числе приводит к снижению возможности ошибки, так называемого «человеческого фактора». Специалист в данной области сканирует каждый провод и распределяет их по структуре жгута в соответствии с требованиями конструкторской документации, что позволяет идентифицировать провода более эффективно. Используют специальные маркировочные принтеры для маркировки проводов.

Один из современных способов изготовления жгутовых изделий – это интерактивный помощник (рис. 2), который обеспечивает комплексное решение, предоставляя программное обеспечение для формирования электронных технологических карт, содержащих руководство, которое позволяет регламентировать все возможные повторяющиеся процессы по монтажу жгутов проводов на магнитной площадке. С помощью этой системы специалист может создать цифровую технологическую карту сборки жгута, включающую информацию о длине каждого провода, сечении, марке, длине зачистки слева и справа, а также адресе проводки разъема [4, 5].

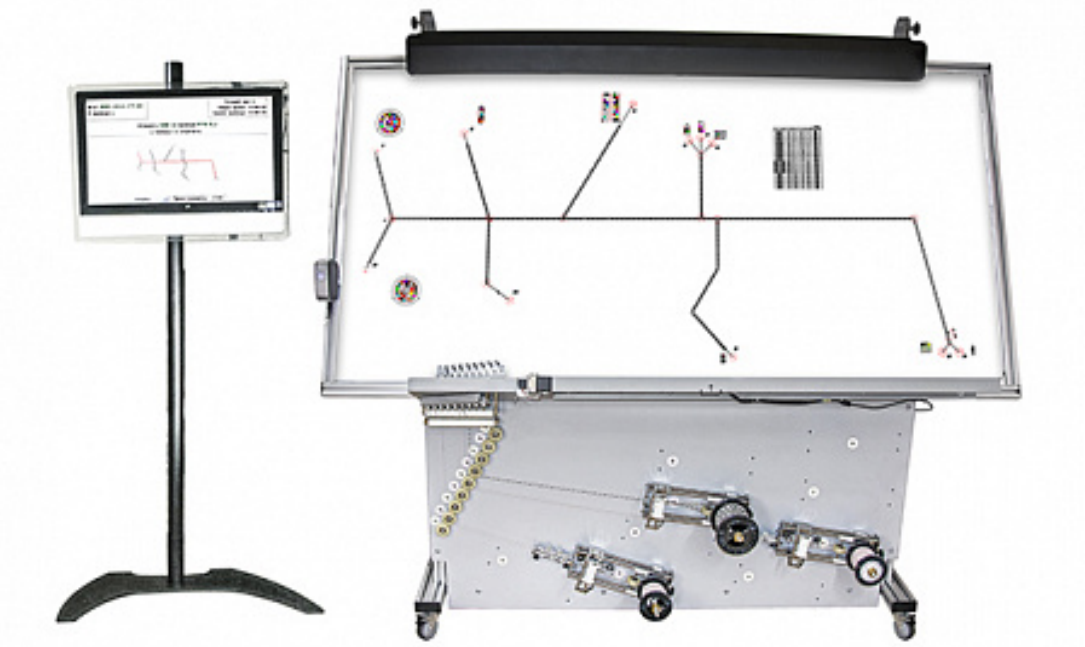


Рис. 2. Пример интерактивного помощника монтажника жгутов

Концы проводов маркируются адресными технологическими метками, которые генерируются автоматически. Каждый провод размещается там, где он должен находиться, в зависимости от назначенного пути, отображаемого на экране компьютера, и в это время автоматически печатаются метки. В зависимости от ситуации установщик может

измерить и отрезать провода от конкретных разматывателей, одновременно получая советы о том, как уложить пучок от начала до конца. Кроме того, этот метод позволяет выполнять резку проводов путем отправки задания в секцию заготовок, где она замеряется и нарезается, а также маркируется, а затем помещает подключенные по адресам в промежуточную систему хранения заготовок. Возможно также использование автоматической зачистки проводов (в том числе лазерной), при помощи специальных опрессовочных (обжимных) машин установки на провод наконечников (или контактов).

В систему автоматизированного проектирования включен ряд программных модулей и в том числе различных конфигураций, базовая цель которых заключается в формировании логики электротехнического проекта. При создании высокотехнологичной продукции предлагаемое решение обеспечивает сквозной цикл проектирования [6-8]. Обеспечивает совместимость схем между электрическими кабелями и автоматически оптимизирует прокладку кабеля, а также предоставляет данные о длине проводов, весе, или диаметре.

В ней используют базы данных электрорадиокомпонентов, образцов, по которым изготавливаются изделия одинаковые по форме, размеру, то есть шаблонов и в том числе инструментов для форсированного и качественного создания проектной и конструкторской документации жгутов. Они предоставляют возможность интенсифицировать подготовку производства, предоставляя информацию сразу с конструкторского отдела на производственную линию, принимая во внимание абсолютно все особенности каждой сборки.

Использование новейших систем проектирования позволит:

- уменьшить время, затрачиваемое на разработку;
- создать 3D модель жгута и оптимизировать его геометрию в готовом изделии, которое закончено производством;
- одновременно проектировать механические узлы и, кроме того, жгутовые сборки;
- обеспечить единую информационную среду от разработчиков до операторов и монтажников;
- сократить время подготовки производства жгутов.

Таким образом, совершенствование технологии изготовления жгутовых изделий РЭА позволит повысить качество выпускаемой продукции и производительность.

Список литературы

1. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. 528 с.
2. Гелль П.П. Иванов-Есипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд. 2018. 536 с.
3. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 360 с.
4. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. М.: Высш. шк., 2000. 432 с.
5. Кунафина А.О., Чертовских С.В. Современные способы изготовления жгутовых изделий радиоэлектронной аппаратуры // Материалы 51-й международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 80-летию девонской нефти / коллектив авторов. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2024. С. 943-947.
6. Степаненко Н.Ю., Чертовских С.В., Лукьянов В.В., Астанин В.В. Технология изготовления защитной кромки для полимерных композитных изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 197-203.
7. Камалетдинова Р.Р., Мамлеев Р.Ф., Мамлеев Р.Ф., Чертовских С.В., Шустер Л.Ш. Вопросы применения керметов на основе карбида титана в трубопроводной запорной арматуре // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 2 (110). С. 3-6.
8. Чертовских С.В., Шустер Л.Ш., Мисоченко А.А., Столяров В.В. Влияние размера зерен и температуры контакта на триботехнические характеристики сплава Ti49,3Ni50,7 // Воронежский научно-технический вестник. 2015. № 4(14). С. 22-26.

Чертовских Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, chertovskikh@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Кунафина Анна Олеговна, магистрант, akar99805@gmail.com, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Рубцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, sunset202@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Демченко Мария Вячеславовна, канд. техн. наук, доцент, m.v.demchenko@yandex.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Хакимова Ирина Рафаэлевна, старший преподаватель, irinagorl@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский университет науки и технологий

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING HARNESS PRODUCTS

S.V. Chertovskikh, A.O. Kunafina, A.V. Rubtsov, M.V. Demchenko, I.R. Khakimova

The work examines the issues of improving the technology for manufacturing harness products of radio-electronic equipment: the use of modern CAD systems for 3D modeling, the development of design and technological documentation; introduction of automated lines at stages of the production cycle; use of an interactive assistant.

Key words: harness, harness products, components, electrical engineering.

Chertovskikh Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, Head of the Department, chertovskikh@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Kunafina Anna Olegovna, master's, akar99805@gmail.com, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Rubtsov Alexey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, sunset202@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Demchenko Maria Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, docent, m.v.demchenko@yandex.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Khakimova Irina Rafaelevna, senior lecturer, irinagorl@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa University of Science and Technology

УДК 621.785.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-478-479

УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Т.И. Дородных, А.В. Парамонов

В настоящей работе рассматривается подход к определению циклической долговечности при статическом и кратном нагружениях пьезоактивных трансверсально – изотропных материалов, Подход основан на использовании статистического критерия разрушения материала в мерах поврежденности и структурно-вероятностной модели накопления в нем микродефектов. Для описания деформирования материалов используются стохастические уравнения электроупругости микронеоднородной среды (метод условных моментов). С целью иллюстрации подхода к определению долговечности пьезокерамических конструкций рассматривается задача о долговечности пьезокерамических стержней при продольных колебаниях, возбуждаемых переменной во времени разностью потенциалов.

Ключевые слова: циклическая долговечность, усталостное разрушение микроповреждаемость, статистический критерий разрушения, электорупригие постоянные материала.

Результаты исследования особенностей деформирования, разрушения и долговечности пьезоэлектрических материалов (пьезокерамик) в виду их практической важности и актуальности широко отражаются в научной литературе [1-3].

Целью настоящей работы является построение модели статического и усталостного разрушения для трансверсально-изотропных пьезоэлектрических материалов на основе вероятностной модели механизма хрупкого микроразрушения (микроповреждаемости). В статье применяется вариант статистического критерия прочности [4] при статических и повторяющихся нагружениях хрупких трасверсально-изотропных материалов, которые разрушаются путем образования трещин отрыва при малых упругих деформациях. Его суть заключается в отождествлении значения концентрации микродефектов, вызываемого рассматриваемым видом нагружения тела, с критическим значением концентрации микродефектов, которое для данного материала является причиной начала макроразрушения**.** Заметим, что различие между упругими и электроупругими материалами в рассматриваемой задаче связано только с природой появления в теле механических напряжений, являющихся причиной механического разрушения силовое либо электросиловое воздействие.

Процесс накопления рассеянных микроповреждений существенным образом зависит от характера нагружения тела, который определяется знаком действующих напряжений (растяжение либо сжатие), скоростью нагружения, кратностью приложения нагрузки и др. Использование структурно-вероятностного подхода к изучению микроразрушения дает возможность определения параметров, описывающих явление микроразрушения при соответствующем конкретному материалк феноменологическом критерии прочности. В частности, применительно к трансверсально-иотропному материалу, моделирующему предварительно поляризованную пьезокерамику [5,8], в качестве такого критерия используется критерий прочности Мизеса – Хилла [5]. Если в неподвижной системе координат $0x_1x_2x_3$, связанной с представительным объемом тела из такого материала, заданы некоторые средние условные напряжения $\sigma_{ij}\ (i,\ j=1,2,3)$, то указанный критерий имеет вид

$$\frac{\sigma_{11}^2}{\sigma_{(bi)11}^2}+\frac{\sigma_{22}^2}{\sigma_{(bi)11}^2}+\frac{\sigma_{33}^2}{\sigma_{(bi)33}^2}+\frac{\sigma_{12}^2}{\sigma_{(bi)12}^2}+\frac{1}{\sigma_{(bi)13}^2}\left(\sigma_{13}^2+\sigma_{23}^2\right)-\left(\frac{2}{\sigma_{(bi)11}^2}-\frac{1}{\sigma_{(bi)33}^2}\right)\sigma_{11}\sigma_{22}-\frac{1}{\sigma_{(bi)33}^2}(\sigma_{22}\sigma_{33}+\sigma_{11}\sigma_{33})=1. \quad (1)$$

Соотношение (1) записано в предположении совпадения координатных осей с основными осями симметрии механических свойств рассматриваемого материала, в частности , в случае пьезокерамики: ось $0x_3$ совпадает с направлением поляризации, оси $0x_1,0x_2$ связаны с плоскостью изотропии.Согласно этого критерия, для определения начала разрушения хрупкого трансверсально - изотропного материала при сложном напряженном состоянии необходимо знать четыре константы, характеризующие наступление разрушения материала при чистом растяжении ($i=1$) либо сжатии ($i=2$) в основных направлениях анизотропии $\left(\sigma_{(bi)11}=\sigma_{(bi)22},\sigma_{(bi)33}\right)$ и чистом сдвиге в главных плоскостях $\left(\sigma_{(bi)12},\sigma_{(bi)13}\right)$.

Трансверсально – изотропный материал является частично упорядоченным вследствие наличия преимущественной пространственной ориентации (текстуры) структурных элементов в материале. В некотором приближении наличие текстуры позволяет считать, что максимальное и минимальное значения пределов прочности структурных элементов совпадает с условными пределами прочности образцов, вырезанных в направлениях главных осей анизотропии. Для рассматриваемого материала пределы прочности на растяжение (сжатие) и чистый сдвиг зависят от направления, определяемого поворотом систем координат $0x_1x_3$, $0x_2x_3$ на угол ϑ относительно осей $0x_2$ либо $0x_1$. Формулы для пересчета предела прочности при растяжении (сжатии) $\sigma_{(bi),\vartheta}$ в направлении, определяемом углом ϑ, который отсчитывается от оси $0x_3$, могут быть получены из (1)

$$\sigma'_{(bi),\vartheta}=\sigma'_{(bi)33}=\frac{\sigma_{(bi)33}}{\sqrt{\cos^2\vartheta+\sin^2\vartheta\dfrac{\sigma^2_{(bi)33}}{\sigma^2_{(bi)11}}+\left(\dfrac{\sigma^2_{(bi)33}}{\sigma^2_{(bi)13}}-1\right)\sin^2\vartheta\cos^2\vartheta}}= \\ =\frac{\sigma_{(bi)33}}{\sqrt{\cos^4\vartheta+\sin^2\vartheta\dfrac{\sigma^2_{(bi)33}}{\sigma^2_{(bi)11}}+\dfrac{\sigma^2_{(bi)33}}{\sigma^2_{(bi)13}}\sin^2\vartheta\cos^2\vartheta}}. \tag{2}$$

Как показано ранее в работах [6,8,9] для описания прогрессирующей микроповрежденности в пьезоэлектрических материалах, используется структурная модель накопления повреждений Даниэлса, а в качестве функции распределения механической микропрочности структурных элементов используется степенной закон с плотностью и интегральной функцией распределения вида

$$f_i(\sigma_i)=\frac{dF_i(\sigma_i)}{d\sigma_i}=\alpha_i\left(\frac{1}{\sigma_{mi}-\sigma_{0i}}\right)\left(\frac{\sigma_i-\sigma_{0i}}{\sigma_{mi}-\sigma_{0i}}\right)^{\alpha_i-1},\quad F_i(\sigma_i)=\left(\frac{\sigma_i-\sigma_{0i}}{\sigma_{mi}-\sigma_{0i}}\right)^{\alpha_i}. \tag{3}$$

В формулах (4) введены обозначения: σ_i – случайные значения пределов прочности структурных элементов отрыва при растяжении $(i=1)$ и сжатии $(i=2)$, имеющих смысл параметра $\sigma(\vartheta)$ из (2); σ_{0i},σ_{mi}, α_i – минимальное и максимальное значения указанных величин и соответствующие коэффициенты рассеивания отрывной микропрочности. Концентрация микротрещин в растягиваемом либо сжимаемом напряжениями σ'_{33} в случайном образце трансверсально- изотропного тела при двухпараметрическом описании распределения микропрочности структурных элементов отрывом (при $\sigma_{i0}=0$) плотность микродефектов определяется формулой

$$\varepsilon_i=F_i(\bar{\sigma}_{33})=\left(\frac{\bar{\sigma}_{33}}{\sigma_{mi}}\right)^{\alpha_i}\quad (i=1,2), \tag{4}$$

где соответственно при растяжении ($\sigma'_{33}>0$) и сжатии ($\sigma'_{33}<0$) для локального напряжения $\bar{\sigma}_{33}$ имеют место формулы

$$\bar{\sigma}_{33}\approx\frac{\sigma'_{33}}{1-F_1(\bar{\sigma}_{33})},\quad \bar{\sigma}_{33}=\sigma'_{33}. \tag{5}$$

Здесь $\bar{\sigma}_{33}$ – локальные истинные напряжения σ'_{33} – условные (истинные напряжения отличаются от условных тем, что первые относятся к площадкам поврежденной среды, вторые — к площадкам сплошной среды). Условные локальные напряжения σ'_{33} и заданные в теле средние напряжения σ_{kl} связаны преобразованием

$$\sigma'_{33}=\sigma_{kl}\alpha_{3k}\alpha_{3l}, \tag{6}$$

где α_{ik},α_{3l} — определяемые углами Эйлера направляющие косинусы собственной системы координат некоторой микротрещины по отношению к лабораторной системе координат.

Статистический критерий прочности представляется соотношением

$$F_i(\bar{\sigma}_{33\max})\le\varepsilon_{icr}, \tag{7}$$

где $F_i(\bar{\sigma}_{33\max})=\varepsilon_{im}$ – концентрация трещин в сечении с максимальным локальным нормальным условным напряжением, которая в случае мгновенного достижения условным напряжением значения σ'_{33m} определяется из уравнения

$$\varepsilon_{1m}(1-\varepsilon_{1m})^{\alpha_1}=\left(\frac{\sigma'_{33m}}{\sigma_{1m}}\right)^{\alpha_1},\quad \varepsilon_{2m}=\left(\frac{\sigma'_{33m}}{\sigma_{2m}}\right)^{\alpha_2} \tag{8}$$

Формулы для критических значений концентрации микротрещин при монотонном (статическом) повышении условных напряжений до значений σ'_{33} имеют вид

$$\varepsilon_{1cr}(1-\varepsilon_{1cr})^{\alpha_1-1}=\left(\frac{\sigma'_{(b1)33}}{\sigma_{m1}}\right)^{\alpha_1},\ \varepsilon_{2cr}=(1-\varepsilon_{2cr})\left(\frac{\sigma'_{(b2)33}}{\sigma_{m2}}\right)^{\alpha_2}. \tag{9}$$

Здесь $\sigma_{(bi)33}=\sigma_{(bi),\vartheta}\,(i=1,2)$ средние значения пределов прочности, определяемые формулой (2), соответственно при растяжении и сжатии образцов материала, вырезаемых под некоторым углом ϑ к направлению главной оси анизотропии (поляризации). Критическое значение плотности микродефектов является общим признаком начала разрушения материала независимо от характера нагружения.

В случае сложного напряженного состояния, определяемого главными напряжениями $\sigma_{ii}\ (i=1,2,3)$ в лабораторной системе координат, статистический критерий прочности для трансверсально-изотропных тел можно построить используя уравнение (1), представив его в главных напряжениях.

$$\frac{\sigma_{11}^2}{\sigma_{(bi)11}^2}+\frac{\sigma_{22}^2}{\sigma_{(bi)11}^2}+\frac{\sigma_{33}^2}{\sigma_{(bi)33}^2}+\left(\frac{2}{\sigma_{(bi)11}^2}-\frac{1}{\sigma_{(bi)33}^2}\right)\sigma_{11}\sigma_{22}-\frac{1}{\sigma_{(bi)33}^2}(\sigma_{22}\sigma_{33}+\sigma_{11}\sigma_{33})=1. \tag{10}$$

Выражая входящие в (10) напряжения $\sigma_{kk}, \sigma_{(bi)kk}\ (k=1,2,3)$ через соответствующие им плотности микродефектов $\varepsilon_{(i)k}$

$$\varepsilon_{(i)k}=F_i(\bar{\sigma}_{kk})=\left(\frac{\bar{\sigma}_{kk}}{\sigma_{(mi)k}}\right)^{\alpha_{(i)k}}\ (k=1,2,3),\ \varepsilon_{(bi)k}=F_i(\bar{\sigma}_{(bi)kk})=\left(\frac{\bar{\sigma}_{(bi)kk}}{\sigma_{(mi)k}}\right)^{\alpha_{(i)k}};$$

$$H_k=(\varepsilon_{(i)k}-\varepsilon_{(i)k0})^{\frac{1}{\alpha_{(i)k}}}(1-\varepsilon_{(i)k})^{1-\frac{1}{\alpha_{(i)k}}}; \tag{11}$$

$$G_k=(\varepsilon_{(bi)k})^{\frac{1}{\alpha_{(i)k}}}(1-\varepsilon_{(bi)k})^{1-\frac{1}{\alpha_{(i)k}}};$$

$$\sigma_{kk}=H_k\sigma_{(mi)k};\ \sigma_{(bi)kk}=G_k\sigma_{(mi)k};\ \left(\frac{\sigma_{kk}}{\sigma_{(bi)kk}}\right)^2=\left(\frac{H_k}{G_k}\right)^2,$$

то в концентрациях микроповреждаемости критерий примет вид

$$\sum_{k=1}^{3}\left[\frac{H_k}{G_k}\right]^2+\left[\frac{2}{G_1{}^2\left(\sigma_{(mi)1}\right)^2}-\frac{1}{G_3{}^2\left(\sigma_{(mi)3}\right)^2}\right]\times H_1H_2(\sigma_{(mi)1})^2-\frac{H_3}{G_3{}^2\left(\sigma_{(mi)3}\right)^2}\sum_{k=1}^{2}\sigma_{(mi)k}H_k=1. \tag{12}$$

В соотношениях (11), (12) индексом i обозначено растяжение либо сжатие, индекс k связан с обозначениями главных осей анизотропии материала. Для определения плотности микродефектов при решении конкретных задач, требуются соответствующие параметры функций распределения микропрочности $\sigma_{0i,}, \sigma_{mi}$, α_i. В работах [4,6,7,8] подробно изложен подход к определению этих параметров по соответствующим условным параметрам макропрочности отрывом для выборки макрообразцов: $\sigma_{(bi),\vartheta}$ – условный предел прочности, $D_{(bi),\vartheta}$ – соответствующее стандартное отклонение, σ_{0i} – минимальное значение временного сопротивления. Приведем применяемые в дальнейших расчетах полученные формулы.

$$\alpha_1=-1+\frac{1}{k_1}\sqrt{1+k_1{}^2},k_1\approx\frac{D'_{(b1),\vartheta}}{\sigma'_{(b1),\vartheta}};\ \ \alpha_2=-1+\frac{1}{k_2}\sqrt{1+k_2{}^2},k_2\approx\frac{D'_{(b2),\vartheta}}{\sigma'_{(b2),\vartheta}}. \tag{13}$$

$$\sigma_{m1}=\sigma'_{(b1),\vartheta}\frac{(1+\alpha_1)^{\frac{1}{\alpha_1}+1}}{\alpha_1},\qquad \sigma_{m2}=\sigma'_{(b2),\vartheta}\frac{1+\alpha_2}{\alpha_2}. \tag{14}$$

Применение статистического критерия разрушения при определении долговечности пьезокерамических конструкций. Рассмотрим применение статистического критерия разрушения, представленного в мерах (концентрация микродефектов) повреждаемости материала для исследования усталостного разрушения и долговечности пьезокерамических стержней при продольных колебаниях, возбуждаемых переменной во времени (t) разностью потенциалов, прикладываемых на торцевых гранях стержня в виде

$$\psi_{x_3=0}=\psi_{x_3=l}=\pm V_0e^{i\omega t}. \tag{15}$$

Необходимо отметить,что механические напряжения вторичного пьезоэффекта устанавливаются практически мгновенно (это связано с большими значениями скорости распространения электро-магнитных волн), следствием чего является и мгновенное появление микротрещин в бесконечно малых структурных элементах пьезоэлектрических материалов. В связи с этим влиянием значений частоты внешнего электрического возбуждения на характер трещинообразования в материале при циклическом электрическом нагружении пренебрегаем. Случай механического нагружения требует отдельного рассмотрения, поскольку механическое возбуждение в упругом теле распространяется со скоростью звука.

При решении задачи о долговечности для стержней необходимо и достаточно обладать данными о максимальных значениях осевого нормального напряжения при задаваемых параметрах внешнего воздействия, а также о критических значениях концентрации микротрещин при чистом статическом растяжении выборки образцов из рассматриваемого конкретного материала. Задача о продольных колебаниях пьезокрамчесого призматического стержня длиной l с осевой поляризацией рассмотрена в [10]. Колебания возбуждались переменной разностью потенциалов (4.1), прикладываемых к торцевым электродам. Внешние механические напряжения на всей поверхности стержня отсутствовали. Уравнения пьезоэффекта в принятой выше системе координат $0x_1x_2x_3$ принимались в виде

$$\varepsilon_{ij}=s_{ij\alpha\beta}\sigma_{\alpha\beta}+d_{nij}E_n,\qquad \sigma_{ij}=\lambda_{ij\alpha\beta}\varepsilon_{\alpha\beta}-e_{nij}E_n,$$
$$D_k=\chi^{\sigma}_{kn}E_n+d_{k\alpha\beta}\sigma_{\alpha\beta}.\qquad D_k=\chi_{kn}E_n+e_{k\alpha\beta}\,\varepsilon_{\alpha\beta},\qquad (i,j,\alpha,\beta,k,n=1,2,3), \tag{16}$$

где податливости $s_{ij\alpha\beta}$, упругие модули $\lambda_{ij\alpha\beta}$, пьезоэлектрические модули $d_{k\alpha\beta}, e_{k\gamma\rho}$ и диэлектрические проницаемости $\chi_{kn}, \chi^{\sigma}_{kn}$ связаны соотношениями

$$s^E_{ij\alpha\beta} = \lambda^{-1}_{ij\alpha\beta},\ d_{k\alpha\beta} = e_{k\gamma\rho}\lambda^{-1}_{\gamma\rho\alpha\beta},\ \chi^\sigma_{kn} = \chi_{kn} + e_{kij}d_{nij} \tag{16.1}$$

Упрощенные уравнения пьезоэффекта в принятой выше системе координат $0x_1x_2x_3$, принимались в виде

$$\varepsilon_{3333} = s^E_{3333}\sigma_{33} + d_{333}E_3,\ D_3 = \chi^\sigma_{33}E_3 + d_{333}\sigma_{33}. \tag{17}$$

Связанная система уравнений электроупругости в рассматриваемой задаче имела вид

$$u_{3,33} + d_{333}\psi_{,33} = \rho s^E_{3333}u_{3,tt},\ \frac{d_{33}}{s^E_{3333}}u_{3,33} - \chi^\sigma_{33}\left(1-k^2_{33}\right)\psi_{,33} = 0, \tag{18}$$

где $k^2_{333} = d^2_{333}/s^E_{3333}\chi^\sigma_{33}$ – продольный статический коэффициент электромеханической связи. Значения остальных обозначений приведены в [10].

В результате решения рассматриваемой задачи амплитудное значение осевого напряжения в стержне получено в виде

$$\overline{\sigma}_{33} = \frac{A\lambda}{s^E_{3333}\left(1-k^2_{333}\right)}\cos\lambda\left(\frac{l}{2}-x_3\right) + \frac{d_{333}}{s^E_{3333}}B, \tag{19}$$

где

$$A = -\frac{d_{333}\left(1-k^2_{333}\right)}{\frac{\lambda l}{2}\cos\frac{\lambda l}{2} - k^2_{333}\sin\frac{\lambda l}{2}}V_0,\ B = \frac{\frac{\lambda l}{2}\cos\frac{\lambda l}{2}}{\frac{\lambda l}{2}\cos\frac{\lambda l}{2} - k^2_{333}\sin\frac{\lambda l}{2}}\left(\frac{2V_0}{l}\right), \tag{20}$$

$$\lambda = \omega/c, c = 1/\sqrt{\rho s^E_{3333}\left(1-k^2_{333}\right)}.$$

Согласно (18), (19) максимальное амплитудное значение напряжения имеет место в средине стержня

$$\overline{\sigma}_{33a} = \frac{A\lambda}{s^E_{3333}\left(1-k^2_{333}\right)} + \frac{d_{333}}{s^E_{3333}}B = V_0 = \frac{d_{333}\omega\left(\cos\frac{\omega l}{2c}-1\right)}{c\,s^E_{3333}\left(\frac{\omega l}{2c}\cos\frac{\omega l}{2c} - k^2_{333}\sin\frac{\omega l}{2c}\right)}V_0. \tag{21}$$

Для определения долговечности пьезокерамического стержня при циклическом электрическом нагружении, предположим, что образец из сплошного $\left(\varepsilon_{1(0)} = 0\right)$ материала подвергается одноосному циклическому растяжению с амплитудным напряжением $\overline{\sigma}_{33a}$.В результате первого цикла нагружения поврежденность в стержне будет определяться соотношением

$$\varepsilon_{1(1)} = \left(1-\varepsilon_{1(1)}\right)^{1-\alpha_1}\left(\frac{\overline{\sigma}_{33a}}{\sigma_{m1}}\right)^{\alpha_1} \tag{22}$$

В результате n – го растяжения в поперечном сечении образца появятся разрушенные структурные элементы, плотность которых будет определяться соотношением

$$\varepsilon_{1(n)} = \varepsilon_{1(n-1)} + \left(1-\varepsilon_{1(n)}\right)^{1-\alpha_1}\left(\frac{\overline{\sigma}_{33a}}{\sigma_{m1}}\right)^{\alpha_1}. \tag{23}$$

Здесь $\varepsilon_{1(n-1)}$ и $\overline{\sigma}_{33a(n-1)}$ – соответственно концентрация микродефектов и амплитудное значение напряжения, устанавливающихся вследствие предшествующего $n-1$ – го растяжения образца. Усталостное разрушение образца наступит при $N-$ ом растяжении, когда прогрессирующая концентрация микротрещин достигнет критического значения $\varepsilon_{1(N)} = \varepsilon_{1cr}$, определяемого соотношением

$$\varepsilon_{1cr} = \varepsilon_{1(N-1)} + \left(1-\varepsilon_{1cr}\right)^{1-\alpha_1}\left(\frac{\overline{\sigma}_{33a}}{\sigma_{m1}}\right)^{\alpha_1}. \tag{24}$$

Амплитудное значение растягивающего напряжения на n-ом полуцикле растяжения будет определяться электроупругими параметрами, определяемыми соотношениями при ε_{n-1},соответствующем предшествующему полуциклу растяжения

$$\overline{\sigma}_{33a(n-1)} = \frac{d_{333(n-1)}\omega\left(\cos\frac{\omega l}{2c_{(n-1)}}-1\right)}{c_{(n-1)}s^E_{3333(n-1)}\left(\frac{\omega l}{2c_{(n-1)}}\cos\frac{\omega l}{2c_{(n-1)}} - k^2_{333(n-1)}\sin\frac{\omega l}{2c_{(n-1)}}\right)}V_0. \tag{25}$$

Указанным количеством растяжений характеризуется долговечность образца. Долговечность N можно определять путем прямого хода, решая уравнения (23) либо с помощью обратного хода вычислений с использованием соотношения (24). Последний вариант более предпочтителен в связи с отсутствием необходимости решения уравнений (23) произвольной степени, связанной со значением α_1. Необходимость в последовательных вычислениях промежуточных значений концентрации микродефектов при определении долговечности связана с тем, что по мере накопления микротрещин степень повреждающегося воздействия последующих растяжений изменяется, увеличиваясь с ростом количества нагружений.

Приближенный подход к определению N связан с определением на основании (22) нескольких (n) значений приращений концентрации микродефектов $\Delta_i\varepsilon_1$ для отдельных актов растяжения с последующим определением их среднего значения. Этот подход дает для долговечности N выражение

$$N = \varepsilon_{1cr}\left[\left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{m1}}\right)^{\alpha_1} \times \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(1-\varepsilon_{1(i)})^{1-\alpha_1}\right]^{-1} \tag{26}$$

Здесь $\varepsilon_{1(i)} = i\dfrac{\varepsilon_{1cr}}{n}$ – значения концентрации микродефектов из интервала $\left\lfloor \varepsilon_{1(1)}, \varepsilon_{1cr} \right\rfloor$ в порядке их увеличения. Из соотношений (22)–(23) следует зависимость амплитудного напряжения $\overline{\sigma}_{33a(n-1)}$ от количества полуциклов растяжения. Такая зависимость связана с изменением податливости s^E_{3333}, пьезомодуля d_{333} и диэлектрической проницаемости χ^{σ}_{33} с увеличением концентрации микродефектов, которая растет с увеличением полуциклов растяжения стержня.

Полуциклы сжатия в рамках рассматриваемой модели не влияют на ресурс конструкций при одинаковом сжимающем нагружении. Однако при увеличении амплитудного напряжения с ростом циклов сжатия усталостное разрушение возможно и при сжатии за счет указанного увеличения амплитудного напряжения без изменения эффективной площади сопротивления сжатию.

Определения долговечности пьезокерамического стержня. С целью иллюстрации подхода к определению долговечности пьезокерамических конструкций типа преобразователей электро - механической энергии с использованием статистического критерия разрушения рассмотрим задачу о долговечности пьезокерамических стержней из пьезоматериала трансверсально- изотропной симметрии длиной $l = 0{,}2м$ при продольных колебаниях, возбуждаемых переменной во времени разностью потенциалов, прикладываемых на торцевых гранях стержня,

$$V_0 = 2\times10^4 e^{i\omega t},\ \omega = 2\times10^4\, Гц \tag{27}$$

При этом, ось изотропии совпадает с осью поляризации (ось x_3). Прочностные характеристики пьезокерамики ЦТБС-3 [11,12] следующие:

$$\lambda_{11} = 15{,}1;\ \lambda_{12} = 7{,}9;\ \lambda_{13} = 8{,}0;\ \lambda_{33} = 13{,}6;\ \lambda_{44} = 2{,}9;$$
$$\chi_1/\chi_0 = 1610;\ \chi_3/\chi_0 = 1280;\ e_{31} = -7{,}9;\ e_{33} = 17{,}7;\ e_{15} = 15{,}4, \tag{28}$$
$$\rho = 7{,}1\times10^3 кг/м^3,\ \nu = 0{,}3.$$

где упругие и пьезоэлектрические постоянные имеют размерности 10^{10} Па и Кл/м^2 соответственно. χ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума. Временное сопротивление на растяжение и соответствующее стандартное отклонение для выборки образцов ЦТБС-3 имеют следующие значения [11]

$$\sigma_{(b1)0} = 0{,}345\times10^8 \text{Па};\ D_{(b1)0} = 0{,}0484\times10^8 \text{Па};\ k_1 = 0{,}04. \tag{29}$$

Параметры соотношений (23), (24), определяющие концентрацию микротрещин при циклическом нагружении, согласно (13), (14), имеют значения

$$\alpha_1 = 24{,}660,\ \sigma_{m1} = 0{,}427\times10^8\ Па.$$

Для исследуемого материла (28) критическое значение концентрации микротрещин на основании (9) составляет

$$\varepsilon_{1cr} = 0{,}305\times10^{-1}.$$

Для определения долговечности стержня из пьезокерамики с характеристиками, приведенными выше, использовались формулы: (25) с учетом (11-24). Входящие в эти уравнения эффективные пьезоэлектрические модули находятся с использованием метода условных моментов (МУМ). Подробно метод условных моментов для пьезоактивных материалов при прогрессирующем трещинообразовании изложен в работе [8,9]. Отметим, что для нахождения Эффективных пьезоэлектрических модулей, тело сравнения в данной задаче выбиралось в виде

$$\lambda^c_{ij\alpha\beta} = (1-\varepsilon)\lambda^c_{ij\alpha\beta}, \text{где}\ \lambda^c_{ij\alpha\beta} = \lambda^c\delta_{ij}\delta_{\alpha\beta} + 2\mu^c\delta_{ij\alpha\beta};$$
$$\chi^c_{kn} = (1-\varepsilon)\chi^c_{kn}, \text{где}\ \chi^c_{kn} = \chi^c\delta_{kn}.$$

λ^c, μ^c – постоянные Ламе. А плотность микротрещин ε при текущем значении растягивающего условного напряжения σ'_{33} согласно (5, 8) определяется действительным значением корня уравнения

$$(\varepsilon - \varepsilon_0)(1-\varepsilon)^{1-\alpha_1} = \left(\frac{\overline{\sigma}_{33a}}{\sigma_{m1}}\right)^{\alpha_1}$$

Параметр формы зерен пьезокерамики k в рассматриваемом примере принимался равным $k = 1/2$. Несовершенство поляризации моделировалось следующим образом. Часть зерен пьезокерамики с объемной концентрацией c_1 ориентирована вдоль оси x_3 $(\vartheta = 0)$, остальная часть с концентрацией c_2, $(c_1 + c_2 = 1)$ в одном случае равномерно разориентирована в плоскости x_1x_2, $(\vartheta = \pi/2)$, в другом равномерно разориентирована по объему.

Долговечность $N=$ определялась на основании формулы (26), при этом вычисления проводились для $n = 6$.

Значение пьзомодуля e_{33}^* и долговечности N стержня из пьезокерамики ЦТБС-3 для различных состояний

c_2 Равномерная разориентация	e_{33}^* $Кл/м^2$	N	c_2 Разориентация в плоскости x_1x_2	e_{33}^* $Кл/м^2$	N
0,1	17,9	$0{,}184\times10^{38}$	0,1	16,8	$0{,}178\times10^{38}$
0,25	11,4	$0{,}195\times10^{38}$	0,25	10,6	$0{,}19\times10^{38}$
0,4	5,3	$0{,}27\times10^{38}$	0,4	4,77	$0{,}20\times10^{38}$
0	18,12	$0{,}198\times10^{38}$	0	18,12	$0{,}198\times10^{38}$

Заключение. На основе современных представлений о механизме макроразрушения хрупких материалов, с использованием статистического критерия разрушения при статических и циклических нагрузках, предложен подход который может быть использован при оценке долговечности, остаточной прочности пьезокерамических изделий при электроупругом нагружении. Определена долговечность N для пьезокерамического стержня при различных вариантах поляризации. Отмечается, что для нестрогой поляризации $(c_2 \neq 0)$ происходит снижение пьезоэффекта, долговечность же сохраняет порядок для всех рассмотренных случаев.

Список литературы

1. Mitsuhiro Okayasu, Tsukasa Ogawa. Failure Characteristics of PZT Ceramic During Cyclic Loading// Journal of Electronic Materials/ 2020. 49, (9). DOI:10 1007/s11664-020-08303-7.
2. Luo, J **,** Bowen, P. A probabilistic methodology for fatigue life prediction // Acta Materiala, 2003. 51, (12): 3537-3550.
3. Upadhyaya Y.S., Sridhara B.K**.** Fatigue life prediction. A continuum damage mechanics and fracture mechanics approach// Materials &Design, 2012. 35, 220-224.
4. Бабич Д.В. Статистический критерий прочности для хрупких материалов// Проблемы прочности, 2011, (5): 123–137.
5. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / Гольденблат И. И. , Копнов В. А. М. : Машиностроение, 1968. 192 с.
6. Babich D.V., Bastun V.N. On dispersed microdamageability of elastic-brittle materials under deformation// J. Strain Analysisю 2010, 45 (1): 57–66.
7**.** Babich D.V., Bezverkhyi O.I., Dorodnykh T.I, Continuum Model of Deformation of Piezoelectric Materials with Cracks// Applied Mechanics and Materialsю 2015, 784: 161-172.
8. Дородных Т.И., Парамонов А.В. Деформирование пьезоэлектрических материалов с микроповреждениями// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 9. С. 556 – 563.9.
9. Дородных Т.И. Повреждаемость и деформирование поликристаллических материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 1. С. 490 – 495.
10. Электроупругость / Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга Н. А. К. : Наук. Думка, 1989. 279 с.
11. Прочность пьезокерамики / Писаренко Г.Г. К.: Наук. думка, 1987. 232 с.
12. Партон В.З., Кудрявцев Б.А. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел. М.: Наука, 1988. 470 с.

Дородных Татьяна Ивановна, канд. физ.-мат. наук, старший инженер, tdortula@gmail.com, Россия, Тула, Тульский Государственный Педагогический Университет им. Л.Н. Толстого,

Парамонов Андрей Викторович, канд. физ.-мат. наук, доцент, ya,pav1979@yandex.ru Россия, Тула, Тульский Государственный Педагогический Университет им. Л.Н. Толстого

FATIGUE FAILURE OF PIEZOCERAMIC TRANSDUCERS UNDER CYCLIC LOADING

T.I Dorodnykh., A.V. Paramonov

In this paper, an approach to determining the cyclic durability under static and multiple loading of piezoactive transversely isotropic materials is considered. The approach is based on the use of a statistical criterion for the destruction of a material in damage measures and a structural-probabilistic model of the accumulation of microdefects in it. Stochastic equations of electroelasticity of a micro-inhomogeneous medium (the method of conditional moments) are used to describe the deformation and calculate effective piezoelectric modules of materials. In order to illustrate the approach to determining the durability of piezoceramic structures, the problem of the durability of piezoceramic rods under longitudinal vibrations excited by a time-varying potential difference is considered.

Key words: microdamagebility, cyclic durability, fatigue failure, statistical strength criterion, material electroelastic effective properties.

Dorodnykh Tatiana Ivanovna, candidate of physical-mathematical sciences, senior engineer, tdortula@gmail.com, Russia, Tula, L. N. Tolstoy Tula's State Pedagogical University,

Paramonov Andrey Victorovich, candidate of physical-mathematical sciences, docent, ya,pav1979@yandex.ru, Russia, Tula, L. N. Tolstoy Tula's State Pedagogical University

УДК 621.565
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-484-485

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ВРЕМЕНИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАБОТЫ ЗАКАЛОЧНЫХ ТУННЕЛЕЙ

С.А. Петров

В статье рассмотрены основные способы повышения производительности и времени работы двухуровневых спиральных закалочных туннелей для мороженого с помощью изменения их конструкции и программного обеспечения.

Ключевые слова: закалочный туннель, производительность туннеля, температура закаливания, время закаливания.

На сегодняшний день производство мороженого является бурно развивающимся бизнесом в России и странах ближнего зарубежья. Одним из самых важных процессов формирования структуры мороженого является закаливание. Для закаливания мороженого разработано много видов оборудования – закалочные камеры, морозильные камеры на холодильных складах, закалочные туннели и пластинчатые теплообменники-морозильники.

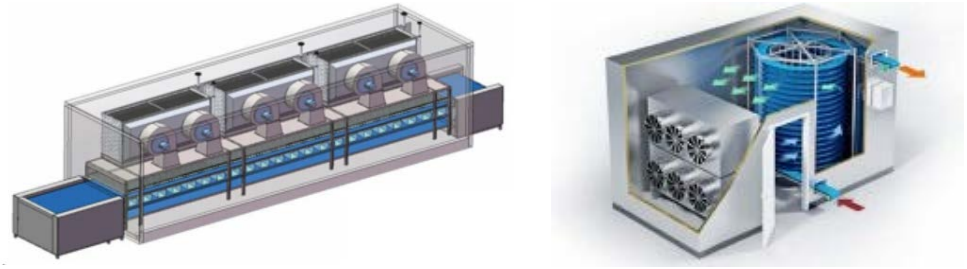
Закалочные камеры (шкафы) используются только при небольших объемах производства и напоминают витрины-холодильники для реализации мороженого в розницу. Следует отметить, что морозильные камеры без циркуляции воздуха ни в коем случае нельзя использовать для закалки мороженого. Морозильные камеры на холодильных складах представляют собой выделенные зоны с циркуляцией холодного воздуха вокруг вновь поступивших упаковок перед их направлением на общее холодильное хранение на том же холодильном складе. [1]

На современных крупных производственных площадках обычно применяются закалочные туннели. Для перемещения упаковок через закалочный туннель используются транспортеры, поддоны и ленты. В них мороженое охлаждается до температуры, которая по ГОСТ 31457-2012 должна быть не выше -18°С. [2]



Рис. 1 Мороженое в закалочном туннеле

Закалочные туннели для мороженого делятся по форме на прямолинейные и спиральные (рис. 2), а также по месту расположения холодильной установки на одноуровневые и двухуровневые, в которых холодильная установка расположена на втором уровне и отделена от продукта горизонтальной перегородкой, которая служит полом для второго уровня.



а ***б***

Рис. 2 Виды закалочных туннелей по форме: а – прямолинейный, б – спиральный

В настоящее время наибольшее распространение получили двухуровневые спиральные закалочные туннели, так как время нахождения продукта в них значительно больше при одинаковых размерах с линейными, а значит температура продукта будет ниже, расположение холодильной установки на втором уровне сделано для удобства доступа и обслуживания туннеля (рис. 3).



Рис. 3 Спиральный двухуровневый закалочный туннель

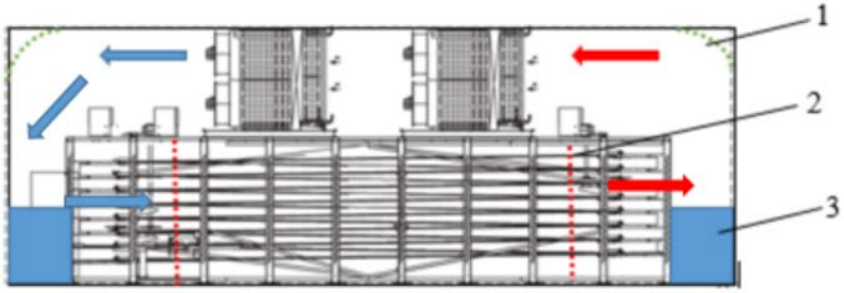


Рис. 4 Схема двухуровневого закалочного туннеля: 1 – скругление углов камеры, 2 – двери, 3 – тамбуры

Время работы закалочных тоннелей без остановки на полную оттайку и мойку должно стремиться к 120-170 часам, на практике же температура внутри туннеля возрастает выше критической для замораживания эскимо и батончиков за 48-60 часов работы. Производительность закалочных туннелей зависит от скорости движения потоков воздуха и увеличения коэффициента конвективной теплопередачи (из-за этого такие туннели иногда называют конвективными морозильными камерами).

Основным уравнением для определения скорости теплопередачи Q является $Q=UA\Delta T$, где U – общий коэффициент теплопередачи, A – площадь поверхности теплопередачи, а ΔT – градиент температуры между воздухом закалочной камеры и центром мороженого. [3]

Во время стандартного производства, если не происходит поломок оборудования, площадь поверхности теплопередачи, температура входящего в туннель продукта и коэффициент теплопередачи практически не изменяются. Однако вследствие поступления теплого и влажного воздуха в камеру из производственной зоны, а также потерь холода через стенки камеры отверстия испарителей покрываются снегом, поток воздуха прогоняемый через них вентиляторами снижается, и температура в камере постепенно повышается, что и приводит в свою очередь к повышению температуры выходящего из камеры продукта, а соответственно к недостаточному промерзанию порций. При температуре закалочного туннеля выше -38°С температура мороженого на выходе из него достигает всего -15°С, что может привести к невозможности отделить порцию от лотков, соответственно к повышенным потерям и снижению производительности производственной линии.

Чтобы этого избежать для современных закалочных туннелей делают специальный фундамент с несколькими слоями термоизоляции, а также стены и потолок, состоящие из сэндвич-панелей, дополнительно обшитых внутри нержавеющей сталью, что практически полностью исключает проникновение через них теплого воздуха и водяного пара. Благодаря отсутствию мостков тепла и холода, швов и стыков понижается потребление электрической энергии. Однако, так как эти камеры предназначены для закаливания мороженого у них есть входное и выходное отверстия для загрузки мягкого и выгрузки закаленного продукта. Через эти отверстия вместе с продуктом поступает теплый воздух из производственной зоны, а также выходит холодный воздух.

Для того чтобы увеличить время непрерывной работы закалочных туннелей необходимо дорабатывать их конструкцию, а также программное обеспечение. Рассмотрим самые распространенные способы увеличения времени работы закалочных туннелей.

1. Уменьшение размера входных и выходных окон для продукта, для того, чтобы меньшее количество тепла поступало и меньшее количество холода выходило из туннеля. Обычно производители делают размер окон таким, чтобы в них мог пройти продукт любого размера (высота некоторых банок для мороженого составляет до 30 см), в случае с эскимо толщина порции варьируется в пределах 15-35 мм, соответственно высоту окна можно снизить до 40 мм.

2. Скругление всех углов в закалочном туннеле. Как видно на рис. 4 холодильная установка расположена на верхнем уровне, воздух вентиляторами продувается через испарители, в которых кипит аммиак, охлаждается до -40°С и движется вниз, для замораживания мороженого при этом воздушные потоки встречаясь с вертикальной стенкой отражаются от нее и движутся хаотично. Установив в углы между потолком и стеной изогнутые листы металла (рис. 4) поток воздуха будет направлен вниз, за счет этого отраженный в обратном направлении поток ослабнет и скорость потока воздуха, направленного вниз будет выше, а соответственно теплообмен увеличится.

3. В случае, когда вентиляторы установлены на втором ярусе и поток воздуха движется параллельно движению порций в пространство между рам и стенами можно установить двери (рис. 4), для того, чтобы большая часть охлаждающего воздуха проходила между рядами движущегося мороженого, быстрее его охлаждая.

4. Установка тамбуров с вентиляторами, которые играют роль «воздушной завесы», на входах и выходах из закалочного тоннеля (рис. 4). Единственным отличием является то, что воздух не подогревается, а используется холодный из туннеля.

5. В программном обеспечении закалочного туннеля можно предусмотреть шаг, называемый быстрой оттайкой, это режим, когда в один или оба испарителя подается горячий аммиак, при этом снежная рубашка начинает таять, образовавшаяся вода в свою очередь сдувается вентиляторами. Важно, чтобы в этом режиме температура в туннеле не превышала достаточной для заморозки порций температуры. Также необходимо следить за количеством оттаек, оно не должно превышать 2 раз за сутки.

6. Еще одной важной доработкой программы работы закалочного туннеля можно считать изменение алгоритма снижения температуры перед запуском. В этом случае закалочный туннель не сразу выходит на режим работы -40°С, замораживая весь влажный воздух туннеля, который впоследствии в виде инея налипнет на испарителе. Цикл заморозки проходит через несколько этапов с различными температурными режимами, при которых воздух в камере максимально осушается, а образовавшийся конденсат отводится из камеры через дренажную систему.

Таким образом, если провести все доработки закалочного туннеля, о которых написано выше можно увеличить время его работы без полной остановки и мойки до продолжительно в 5-7 дней и за счет этого увеличиться производительность туннеля и производственной линии на 20-25% за производственный цикл.

Список литературы

1. H. Douglas Goff, Richard W. Hartel. Ice Cream seventh edition. NY.: Springer Cham, 2013. 462 p.
2. Оленев Ю.А. Технология и оборудование для производства мороженого. М.: ДеЛи, 1999. 272 с.
3. Чумак И.Г., Чепурненко В.П., Чуклин С.Г. Холодильные установки – 2-е изд. перераб. и доп. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 344 с.
4. ГОСТ 31457-2012 Мороженое молочное, сливочное и пломбир. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2014. 23 с.

Петров Сергей Александрович, аспирант, sap71ru@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

METHODS TO INCREASE THE PRODUCTIVITY AND OPERATING TIME OF HARDENING TUNNELS.

S.A. Petrov

The article discusses the main methods to increase the productivity and operating time of two-level spiral hardening tunnels for ice cream by changing their design and software.

Key words: hardening tunnel, tunnel productivity, hardening temperature, hardening time.

Petrov Sergey Aleksandrovich, postgraduate, sap71ru@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК: 658.5.011
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-486-487

ФАКТОРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Е.С. Постникова

Проведен анализ основных факторов эффективности машиностроительного производства ракетно-космической техники. Обоснована необходимость учета ресурсоэффективности, экологичности и безопасности не только для изделий, но и для применяемых технологий в соответствии с требованием формирования наилучших доступных технологий в машиностроении. Производственную технологичность конструкции изделия предложено рассматривать как отдельный фактор эффективности производства, характеризующий уровень затрат времени и средств на достижение требуемого качества изделия и производительности. Остальные виды технологичности рассматривать как характеристики качества изделия, проявляющиеся на этапе его эксплуатации. Основополагающим фактором эффективности производства предложено считать состояние производственной системы, ядро которой составляет технологическая система. Надежность технологической системы в процессе эксплуатации зависит от своевременности выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту, что обеспечивается соответствующей диагностикой состояния промышленного оборудования, ключевых его узлов и агрегатов. Для обеспечения надежности технологической системы предложено формировать условия для предиктивной аналитики состояния технологического оборудования и проактивного его ремонта. Представлена построенная на основе проведенного анализа структура факторов эффективности машиностроительного производства ракетно-космической техники, учитывающая современные тенденции цифровой трансформации предприятий РКП.

Ключевые слова: эффективность производства, ракетно-космическая промышленность, качество продукции, надежность, технологическая система.

Экономическая эффективность производственной деятельности предприятия зависит от качества выпускаемой продукции и объемов ее выпуска, а также от затрат на изготовление изделий. На все эти показатели оказывает влияние состояние активной части основных фондов, а именно состав и работоспособность оборудования, его потенциал по обеспечению требуемого уровня технологичности изделий.

В связи с этим к основным факторам эффективности машиностроительного производства можно отнести качество, производительность и экономичность [1], а также состояние производственной или технологической системы предприятия.

Фактор эффективности производства – «качество изделия». Качество изделия отражает различные его свойства (характеристики), позволяющие удовлетворять существующие или предполагаемые потребности в соответствии с установленными требованиями. Очевидно, что только изготовление продукции, наилучшим образом удовлетворяющей всем требованиям потребителя, может обеспечить ей высокий спрос.

Требования к качеству продукции ракетно-космической промышленности (РКП) определяются главной целью государственной стратегии в сфере освоения космического пространства − создание экономически рентабельной и конкурентоспособной отрасли, обеспечивающей реализацию перспективных программ и гарантированное присутствие России в космосе в качестве ведущего игрока; обеспечение доли в 15–18% на международном рынке отечественной ракетно-космической техники (РКТ) [3].

Основными факторами, характеризующими качество изделия, можно считать его функциональность, ресурсосбережение в эксплуатации, экологичность и безопасность для жизни и здоровья людей.

В 1987 г. Всесоюзным научно-исследовательским институтом по нормализации в машиностроении (ВНИИНМАШ) были разработаны методические подходы к классификации, группированию и определению областей применения показателей качества изделий машиностроения и приборостроения [4].

Данный документ был рекомендован Госстандартом СССР к использованию при разработке новой, пересмотре и упорядочении действующей в машиностроении и приборостроении нормативно-технической и методической документации на систему показателей качества отдельных видов, подгрупп и групп однородной продукции, а также при разработке технических заданий, стандартов и технических условий, карт технического уровня и других видов конструкторских документов на конкретные изделия. Можно утверждать, что в настоящее время рекомендации сохраняют свою актуальность.

Основным признаком, по которому в этом документе предлагают классифицировать и группировать показатели качества изделия, является однородность характеризуемых свойств.

В зависимости от однородности характеризуемых свойств выделяют функциональные, ресурсосберегающие и природоохранные показатели (рис. 1).

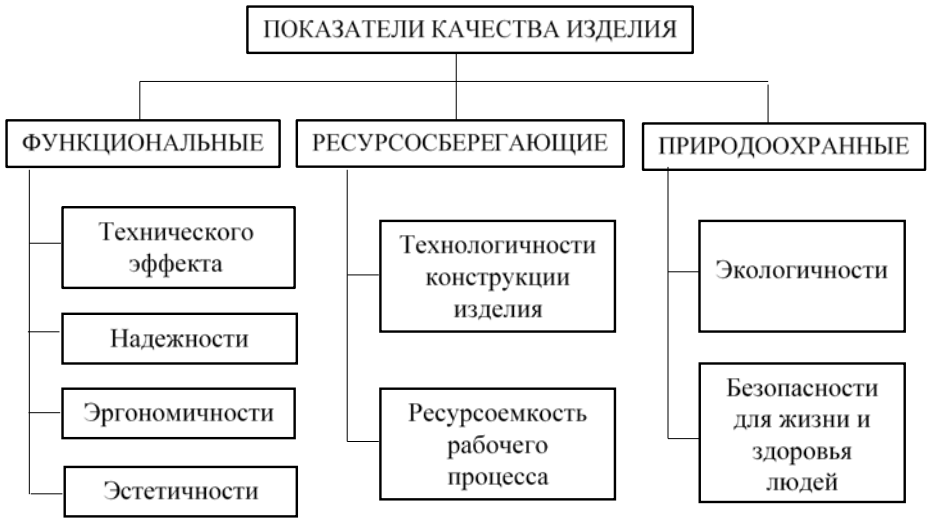


Рис. 1. Группирование показателей качества изделия, классифицируемых по однородности характеризуемых свойств [4]

Функциональные показатели качества изделия характеризуют его техническую сущность, выражающуюся в способности выполнять установленные функции в соответствии с основным назначением, т.е. обеспечивать необходимый полезный эффект. Эти показатели выражают прогрессивность заложенных в конструкцию изделия инженерно-технических решений и играют основную роль при оценке технического уровня изделия.

Ресурсосберегающие показатели качества изделия характеризуют ту часть его свойств, которые предопределяют уровень затрачиваемых при создании и применении изделия ресурсов для формирования, обеспечения и реализации его качества. Они выражают экономическую сущность изделия как объекта разработки, изготовления и использования по назначению во всей совокупности его конструктивных особенностей и потребительских свойств.

Природоохранные показатели качества изделия характеризуют его свойства, связанные с воздействием изделия на человека и окружающую его среду в процессах производства и эксплуатации.

В зависимости от степени детализации однородных свойств функциональные, ресурсосберегающие и природоохранные показатели могут быть разделены на последующих ступенях членения на более мелкие классификационные группировки.

К функциональным предлагают относить показатели технического эффекта, надежности, эргономические и эстетические.

Показатели технического эффекта характеризуют способность изделия выполнять свои функции в заданных условиях использования по назначению. Эти показатели задаются в техническом задании в соответствии с перспективными направлениями и уровнем развития РКТ.

Показатель надежности, рассматриваемый как комплексный показатель, характеризует свойства изделия сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, выражающих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

В ГОСТ 27.002-2015 и ГОСТ Р 27.102-2021 определены свойства изделия, характеризующие его надежность и соответствующие показатели их оценки:

безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения;

долговечность – способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния;

ремонтопригодность – приспособленность к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния, путем технического обслуживания и ремонта;

сохраняемость – способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при соблюдении заданных сроков и условий хранения и (или) транспортирования.

Для РКТ надежность можно считать основополагающим фактором качества изделия, поскольку от нее зависит способность изделия выполнять свои функции в течение требуемого времени без внезапных отказов.

Выбор и обоснование номенклатуры показателей надежности происходит с учетом назначения изделия и условий его эксплуатации.

Так, например, для боевых ракетных комплексов и ракетных комплексов космического назначения, наземного оборудования космических систем и образцов космической техники гражданского и военного назначения оценку надежности целесообразно проводить по всем показателям. Для военного вооружения – ракет, беспилотных летательных аппаратов и дронов-камикадзе оценка долговечности и ремонтопригодности не представляется актуальной.

Показатель эргономичности характеризует приспособленность изделия к эксплуатации человеком и проявляется при функционировании системы «человек – изделие – среда использования». Показатели эргономичности учитывают комплекс гигиенических, антропометрических, физиологических, психофизических и психологических свойств человека.

К ресурсосберегающим относят показатели технологичности конструкции изделия и ресурсоемкости рабочего процесса.

Показатель «ресурсоемкости рабочего процесса», предлагаемый в [4], характеризует экономичность изделия в эксплуатации, т.е. приспособленность его к эффективному использованию ресурсов (энергии, труда, материалов, времени), выделяемых для непосредственного использования изделия по назначению, по сути, отражает эксплуатационную и ремонтную технологичность.

К природоохранным показателям относят показатель экологичности, характеризующий уровень вредных воздействий изделия на окружающую среду, возникающих при его эксплуатации или потреблении, и показатель безопасности, характеризующий «особенности изделия, обусловливающие безопасность человека, сопрягаемых и других объектов на всех режимах эксплуатации (или потребления), транспортирования и хранения изделия» [4].

Соответствие используемых технологий требованиям разработки наилучших доступных технологий. При оценке эффективности машиностроительного производства показатели ресурсоемкости и природоохранные показатели так же должны рассматриваться для применяемых технологий. Ресурсосбережение, экологичность и безопасность производственных процессов для жизни и здоровья людей позволят разрабатывать наилучшие доступные технологии (НДТ) в рассматриваемой отрасли.

Внедрение НДТ предусмотрено международными конвенциями и соглашениями, ратифицированными Российской Федерацией.

«За рубежом внедрение НДТ эффективно осуществляется во всех отраслях промышленности с момента вступления в силу Директивы 96/61/ЕС. В Российской Федерации предусмотрен комплекс мер, направленных на отказ от использования устаревших и неэффективных технологий, переход на принципы НДТ и внедрение современных технологий, утвержденных Распоряжением Правительства РФ от 17.03.2015 № 449-р, а также обеспечение реализации перехода промышленности России на принципы НДТ, включая создание современного отечественного оборудования».

Соответствие производства продукции предприятия критериям НДТ означает в первую очередь обеспечение наименьшего уровня негативного воздействия технологии на окружающую среду в расчете на единицу произведенной продукции, и только потом – доступность этой технологии на данном предприятии.

«Наилучшая» означает технологию, наиболее эффективную для выпуска продукции с достижением установленного уровня защиты окружающей среды. «Доступная» применительно к НДТ означает, что технология может быть внедрена в экономически и технически реализуемых условиях для конкретной отрасли промышленности и предприятия, т.е. при выборе технологии изготовления изделия следует учитывать ее преимущества и затраты на ее внедрение.

Уровень требуемого качества изделий определяет возможные варианты технологий изготовления, использующих соответствующие факторы производства: оборудование, трудовые ресурсы и пр. В процессе отработки конструкции изделия на производственную технологичность выбирается вариант технологии, обеспечивающий наименьшие производственные затраты на достижение требуемого уровня качества конструкции (эксплуатационные характеристики изделия).

В сфере развития НДТ в машиностроении представляется целесообразным применение аддитивных технологий.

Актуальной областью применения аддитивных технологий в машиностроении считают единичное и мелкосерийное производство с позаказной системой планирования, а также опытное производство, где требуется изготовление деталей сложной уникальной конструкции, что обосновывается рядом технических, технологических и организационных преимуществ [5], таких как:

возможность изготовления деталей любой геометрической сложности;

возможность изготовления опытных образцов инновационных изделий уникальной конструкции;

возможность внесения изменений в проект на этапе передачи изделия в производство;

снижение затрат на вспомогательное производство как следствие отсутствия потребности в разработке и изготовлении технологической и инструментальной оснастки, свойственной традиционным методам обработки;

повышение эффективности использования сырья и материалов за счет снижения отходов производства;

сокращение потребности в оборотных средствах для создания производственных запасов в результате упрощения логистики, сокращения времени поставок, уменьшения объемов складских запасов.

возможность удовлетворения индивидуальных требований заказчиков, увеличение номенклатуры изделий.

Производственная технологичность конструкции изделия. Технологичность конструкции можно считать показателем качества изделия, поскольку разработка нового машиностроительного изделия – довольно сложная конструкторская задача, связанная «не только с достижением требуемого технического уровня этого изделия, но и с приданием его конструкции свойств, которые обеспечивают максимально возможное снижение затрат труда, материалов и энергии на его разработку, изготовление, техническое обслуживание и ремонт» [6].

ГОСТ 14.205-83 определяет технологичность конструкции изделия как совокупность свойств этой конструкции, позволяющих достичь оптимальных затрат при производстве изделия, техническом обслуживании и ремонте «для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ».

Данное определение не отражает необходимость обеспечения монтажной технологичности конструкций изделий. Монтажные работы оказывают огромное влияние на качество некоторых видов машиностроительной продукции.

Так, например, если технологическое оборудование смонтировано неправильно, оно может не работать на оптимальных технологических режимах, удовлетворяющих заказчика, или не будет работать вообще. Монтажные работы изделия на месте эксплуатации требуют значительных затрат в связи с необходимостью привлечения высококвалифицированных кадров, при этом количество специалистов по монтажу и работников, выполняющих монтажные работы, ограничено [7].

Для ряда изделий РКП предусмотрены монтажные работы на месте их эксплуатации (применения). Специфические особенности некоторых видов ракетно-космической техники требуют проведения монтажно-сборочных процессов, включающих сварочно-сборочные работы (агрегатную сборку), погрузочно-разгрузочные и транспортно-складские работы, а также работы по изготовлению нестандартного оборудования, подъемно-транспортных средств, средств механизации погрузочно-разгрузочных и транспортных работ [8].

Сборочно-монтажные работы являются составной частью производственного процесса, поэтому вопросы оценки и обеспечения монтажной технологичности отдельно не рассматриваются.

Технологичность конструкции изделия (ТКИ) – понятие комплексное. Показатели ТКИ характеризуют его свойства, определяющие приспособленность конструкции к достижению оптимальных затрат при производстве (производственная технологичность), выполнении монтажных и пуско-наладочных работ (монтажная технологичность), эксплуатации (эксплуатационная технологичность) и ремонте (ремонтная технологичность) для заданных значений показателей качества продукции, объема ее выпуска, условий выполнения работ.

При определении факторов эффективности производства производственную технологичность предлагается рассматривать как отдельный фактор, характеризующий уровень затрат времени (трудоемкость изготовления) и средств (производственная себестоимость) на достижение требуемого качества изделия и производительности (требуемого объема выпуска).

Остальные виды технологичности рассматривать как характеристики качества изделия, проявляющиеся на этапе его эксплуатации.

Применение цифровых технологий позволяет осуществлять более полный анализ возможных конструктивно-технологических вариантов изделия и выбирать из них наиболее рациональный с учетом производственных возможностей их реализации и оптимизации затрат на изготовление, обеспечивающий наиболее высокий для существующих условий производства уровень производственной технологичности изделия [9].

Рассмотренные факторы эффективности производства «качество изделия» и «производственная ТКИ» тесно связаны с производительностью.

Фактор эффективности производства — производительность. Производительность характеризует уровень эффективности производственного процесса.

Экономический словарь терминов определяет производительность как показатель эффективности производства, характеризующий выпуск продукции в расчете на единицу используемых ресурсов (трудовых и материальных), факторов производства; частное от деления объема производства на величину затрат ресурсов на данный объем производства. [10].

При оценке производительности целесообразно проводить анализ эффективности использования средств производства по времени и по мощности, выявляя резервы возможного роста производительности за счет повышения эффективности использования активных основных средств.

Влияние состояния производственной системы на эффективность производства. Рассматривая оборудование в качестве основного элемента, обеспечивающего реализацию технологии изготовления, можно утверждать, что не только вид и уровень загрузки, но и состояние данного ресурса оказывает значительное влияние как на производительность, так и на обеспечение требуемого уровня характеристик изделия и производственную ТКИ.

Кроме того, может оказывать влияние на процессы ресурсосбережения в производстве и природоохранные показатели, т.е. на выбор технологии изготовления изделия по критерию соответствия НДТ.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что основополагающим фактором эффективности производства, от которого зависит реализация на требуемом уровне остальных факторов эффективности, является состояние производственной системы.

«Под производственными принято понимать созданные человеком системы, функции которых сводятся к преобразованию различных физических и биологических объектов или видов энергии» [11].

В машиностроении под ПС понимают взаимоувязанный комплекс элементов, обеспечивающий функции подготовки средств производства, оптимизации обслуживания рабочих мест, получения и хранения материалов и полуфабрикатов, изготовления, сборки, транспортировки, контроля и другие функции, связанные с изготовлением выпускаемой продукции [12].

ПС реализует производственный процесс изготовления изделия и может быть определена как совокупность взаимосвязанных элементов производственной структуры предприятия, выполняющих основные, вспомогательные и обслуживающие производственные процессы, а также функции управления производством.

Основой ПС является технологическая система (ТС) и, следовательно, наиболее важной характеристикой состояния ПС можно считать состояние ТС.

В ГОСТ 27.004-85 ТС определяется как «совокупность функционально взаимосвязанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов или операций».

Согласно ГОСТ 27.202-83, существуют четыре иерархических уровня технологических систем: ТС технологической операции; ТС технологического процесса; ТС, действующие в пределах отдельного производственного подразделения (цех, участок и др.); ТС предприятия.

В условиях, когда возможности ТС одного предприятия не позволяют обеспечить выполнение полного технологического цикла, либо требуемый уровень показателей качества, ТКИ и др., возникает потребность в вовлечении в производственный процесс на основе производственной кооперации других предприятий отрасли, целесообразно введение еще одного уровня иерархии – ТС интегрированной производственной структуры.

Работоспособное состояние ТС зависит от ее надежности, которая проявляется в способности выполнять задания по показателям качества выпускаемой продукции и производительности [13, 14], а также обеспечивать наиболее высокий уровень производственной ТКИ и соответствие технологии его изготовления требованиям НДТ.

Надежность ТС в процессе эксплуатации обеспечивается эффективной диагностикой состояния промышленного оборудования, которая позволяет точно, заблаговременно и информативно оценить текущее состояние ключевых его узлов и агрегатов.

Диагностику целесообразно проводить в непрерывном режиме сбора данных для предиктивной аналитики состояния оборудования и проактивного его ремонта [15].

Современные тенденции цифровой трансформации предприятий РКП, затрагивающей процессы технической подготовки производства, изготовления продукции и обеспечения работоспособности ТС, требуют учета уровня их цифровизации и возможностей использования перспективных технологий при оценке состояния ПС.

На основе проведенного анализа построена структура факторов эффективности машиностроительного производства РКТ (рис. 2).

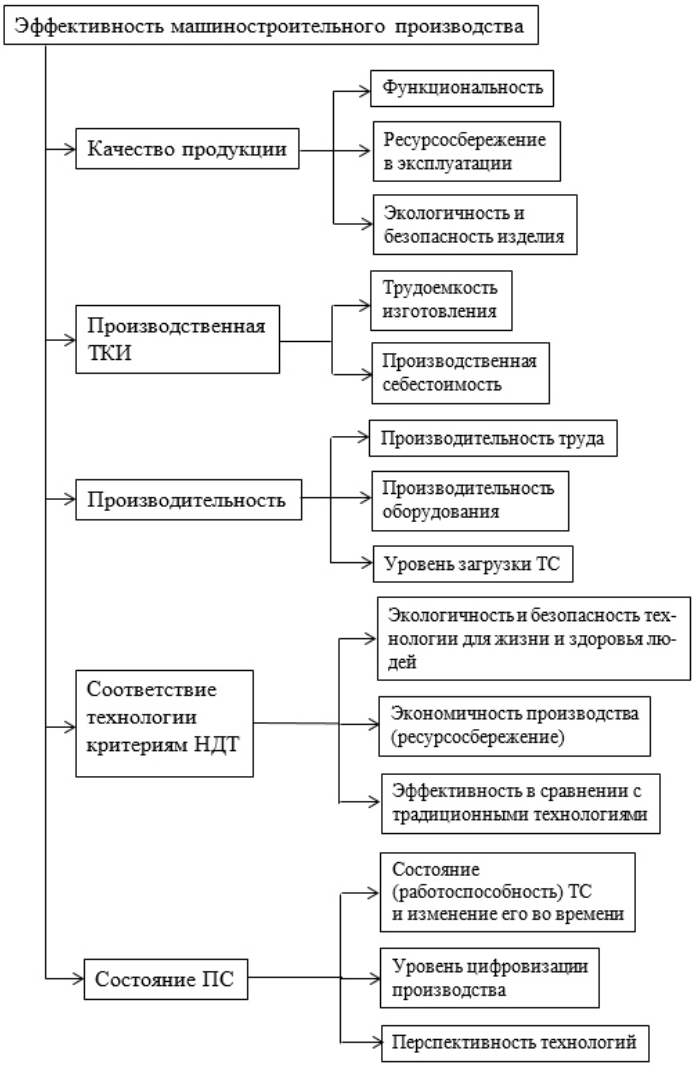


Рис. 2. Факторы эффективности производства

Заключение. Проведенный анализ позволил в качестве основных факторов эффективности машиностроительного производства РКП выделить следующие:

качество изделия как объекта эксплуатации;

производственная технологичность конструкции изделия;

производительность;

соответствие используемых в производстве РКТ технологий современным требованиям разработки НДТ в машиностроении;

состояние ПС.

Основополагающим фактором эффективности производства следует считать состояние ПС, которое в значительной степени зависит от состояния (работоспособности) ТС, характеризуемого надежностью парка и каждой отдельно взятой единицы технологического оборудования (ТО).

Цифровая трансформация предприятий РКП предполагает ускорение разработки и организации производства новых перспективных изделий, разработку и использование перспективных технологий, соответствующих современным требованиям ресурсосбережения, экологичности и безопасности, а также создает реальные условия для внедрения методов предиктивной диагностики и проактивного технического обслуживания ТО, что позволяет обеспечивать его работоспособность с минимальными потерями эффективного фонда времени.

Данное исследование было проведено в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от «23» апреля 2024 г.

Список литературы

1. Рагуткин А.В. Методология исследования связей моделей цифровых машиностроительных производств / диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». 2023.

2. Постникова Е., Ставровский М., Сидоров М. Обеспечение надежности технологических систем машиностроительного производства и оценка ремонтопригодности оборудования // В сборнике: Контроллинг в экономике, организации производства и управлении. Сборник научных трудов XII международного конгресса по контроллингу. Москва. 2023. С. 190–198.

3. Ракетная промышленность [Электронный ресурс]. URL: https://fabricators.ru/article/raketnaya-promyshlennost. Дата обращения 29.07.2024.

4. Рекомендации. Методические подходы к классификации, группированию и определению областей применения показателей качества изделий машиностроения и приборостроения Р 50-54-8-87 / Государственный комитет СССР по стандартам (Госстандарт СССР). Всесоюзный научно-исследовательский институт по нормализации в машиностроении (ВНИИНМАШ). Москва. 1987. 20 с.

5. Постникова Е., Боярская Т. Организация устойчивого развития машиностроительного предприятия в эпоху цифровизации // В сборнике: IX международная конференция, посвященная 190-летию МГТУ имени Н.Э.Баумана: «Контроллинг в экономике, организации производства и управлении: информационная и методическая поддержка менеджмента». Москва. 2020. С. 206–211.

6. Семенов А.Н. Технологичность конструкции изделия машиностроения. Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2016. 217 с.

7. Качество машиностроительной продукции / В.Г. Туркин, Б.И. Герасимов, В.Д. Жариков. Под научной редакцией Б.И. Герасимова. Тамбов: Издательство ТГТУ. 2005. 74 с.

8. Костюков В.Д., Сычев В.Н., Воронков А.В., Цырков А.В. Технологическая подготовка монтажно-сборочного производства РКТ // В сборнике: Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2010). Труды международной конференции. 2010. С. 298–302.

9. Рахмилевич Е.Г. Производственная кооперация на основе конструктивно технологических вариантов продукции // Инновации в менеджменте. 2023. № 1 (35). С. 50–57.

10. Экономический словарь терминов [Электронный ресурс]. URL: https://gufo.me/dict/economics_terms. Дата обращения. 18.07.2024.

11. Исследование и обеспечение применения эффективных технологий / М. И. Сидоров, Д. О. Скобелев, М. Е. Ставровский, А. В. Рагуткин. М.: Издательство «Эко-Пресс». 2020. 232 с.

12. Корсаков В.С. Основы технологии машиностроения. М.: Высшая школа.1974.335 с.

13. Эксплуатация и ремонт технологического оборудования: монография / В.В. Пирогов, М.Е. Ставровский, И.М. Сидоров и др. М.: «Эко-Пресс». 2021. 321с.

14. Постникова Е.С. Разработка метода оценки надежности многоканальных систем по параметрам производительности / Е.С. Постникова, И.М. Сидоров, С.А. Лизунов, Е.Г. Рахмилевич // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 405–411.

15. Правда О.Ю., Яроцкая Н.А. Влияние высокоточной диагностики состояния оборудования на экономику промышленных предприятий // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2022. № 2 (027). С. 78–81.

Постникова Елена Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, postnikova.el@bmstu.ru, Россия, Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

EFFICIENCY FACTORS OF MECHANICAL ENGINEERING PRODUCTION OF ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

E.S. Postnikova

An analysis of the main factors of mechanical engineering production of rocket and space technology was carried out. The need to take into account resource efficiency, environmental friendliness and safety not only for products, but also for the introduction of technologies in accordance with the requirements for the formation of the best available technologies in mechanical engineering is substantiated. The manufacturability of the proposed product models should be considered as a factor of production efficiency, characterizing the level of time and money spent to achieve the required product quality and productivity. Other types of manufacturability should be considered as characteristics of the quality of the product that appear at the stage of its operation. It is proposed to consider the state of the production system, the core of which is the technological system, as the fundamental factor of production efficiency. The reliability of a technological system during operation depends on the timeliness of maintenance and repair work, ensuring the appropriate diagnostic condition of industrial equipment, its key components and assemblies. To ensure the reliability of the technological system, it is proposed to create conditions for predictive analytics of the state of technological equipment and its proactive repair. The structure of efficiency factors of mechanical engineering production of rocket and space technology, built on the basis of the analysis, is presented, taking into account modern trends in the digital transformation of RKP enterprises.

Key words: production efficiency, rocket and space industry, product quality, reliability, technological system.

Postnikova Elena Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, postnikova.el@bmstu.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University

УДК 621
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-492-493

НАДЁЖНОСТЬ КРЕПЛЕНИЯ СМЕННОЙ МНОГОГРАННОЙ ПЛАСТИНЫ НА ШТИФТ ПРИ ТОРЦОВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

В.А. Пухальский, О.О. Офицеров, И.М. Сидоров

В научной статье приводятся результаты исследования влияния конструкционных и технологических факторов на перемещение державки и режущей пластины в процессе попутного торцового фрезерования.

Ключевые слова: процесс торцового фрезерования, фрезерование, торцовая фреза, процесс резания, державка, режущая пластина.

Данные исследования посвящены определению влияния переходных процессов, имеющих место при торцовом фрезеровании на надежность широко применяемого в промышленности крепления сменных многогранных пластинок (СМП) на штифт.

В качестве оборудования в данных исследованиях использован консольно-фрезерный станок мод. 6Р82Ш с мощностью двигателя 10 кВт.

На горизонтальном шпинделе станка была установлена специальная фреза-летучка (см. рис. 1). Наличие съемного вкладыша и пазов, расположенных с торцевой и радиальной сторон фрезы, позволило провести исследования с изменением направления действия силы закрепления пластины относительно главной режущей кромки. Геометрические параметры режущей кромки при проведении всего объема исследований были следующими:

γ = -10°; α = 10°;

φ = 85°; φ_1 = 5°; λ = 10°.

Износ по задней поверхности не достигал величины большей 0,05 мм. В качестве датчиков перемещений режущей пластины использовались тензобалки, концы которых были в контакте с соответствующими точками режущей пластины. В державку был встроен датчик, позволяющий наблюдать во время работы фрезы за изменением силы, с которой державка тянет пластину на базовую поверхность ($P_{зат}$).



Рис. 1. Экспериментальная фреза-летучка

При направлении закрепления пластины ($P_{зат}$) перпендикулярно главной режущей кромке (см. рис. 2,*б*) при попутном фрезеровании во время экспериментов наблюдалось «наползание» пластины на деталь в направлении «*x*». Это явление было нами всесторонне исследовано и получены зависимости, показывающие влияние величины перемещения Δ_x державки вместе с пластиной в зависимости от различных конструкционных и технологических факторов (см. рис. 3).

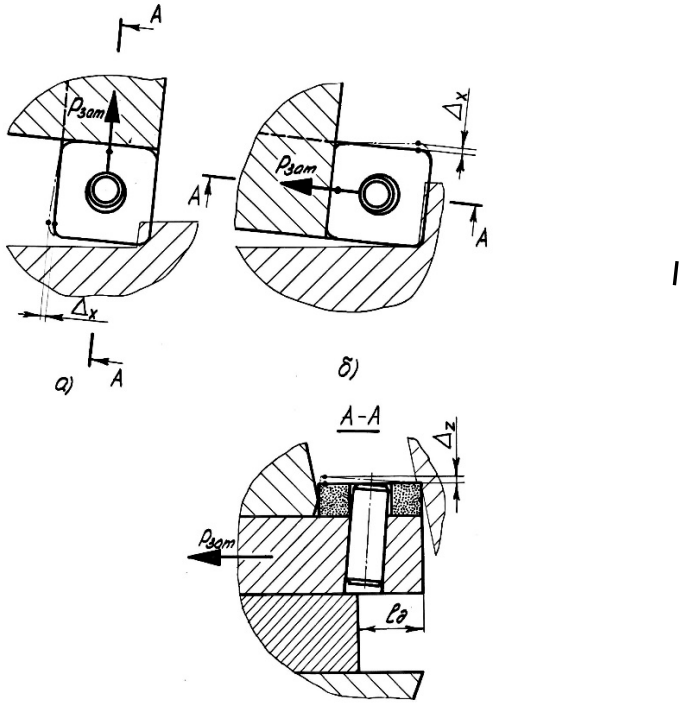


Рис. 2. Варианты исследуемых креплений и схемы измерения перемещений СМП (штрих-пунктиром изображены положения пластины при положительных перемещениях, точками – места контакта тензобалок с пластиной)

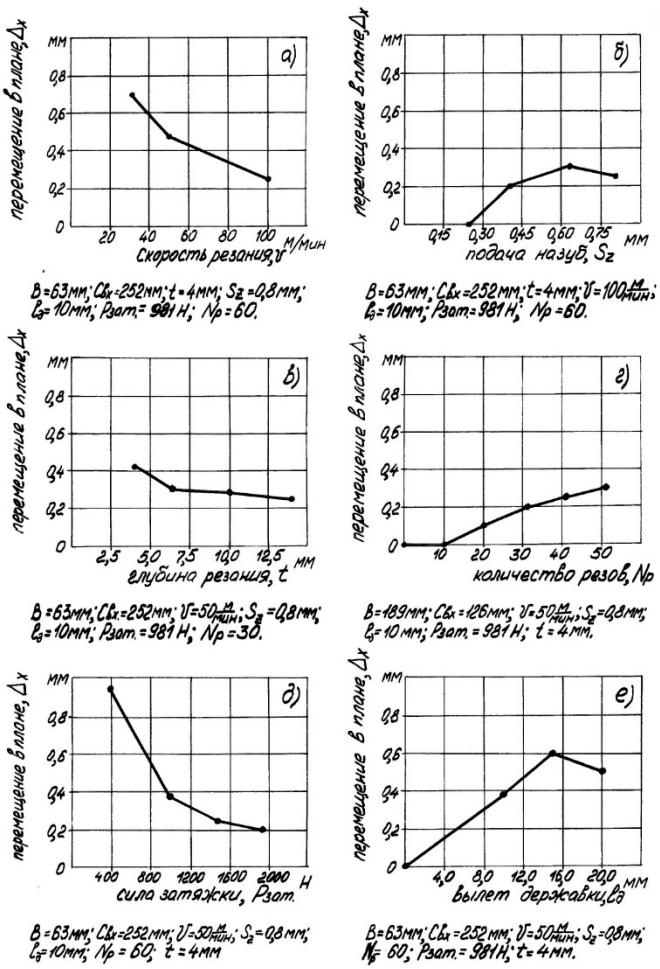


Рис. 3. Влияние различных факторов на перемещение державки в плане при установке резца в поперечном пазе фрезерной головки при попутном фрезеровании (Ø315 мм): B – ширина фрезерования; $C_{вх}$ – смещение фрезы относительно обрабатываемой поверхности

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Сила затяжки при варианте установки «*б*» во время реза уменьшается, при варианте «*а*» увеличивается.
2. Исходя из зависимости перемещения Δ_x от количества резов (*Np*) можно заключить, что нарастание Δ_x происходит постепенно (см. рис. 3,*г*).
3. При исследовании влияния режимов резания на интенсивность перемещения пластины Δ_x установлено следующее:

- с увеличением скорости резания (v)интенсивность нарастания Δ_x уменьшается (см. рис. 3,*а*);
- зависимость Δ_x от величины подачи на зуб (S_z) носит экстремальный характер (см. рис. 3,*б*);
- с увеличением глубины фрезерования (t) интенсивность нарастания Δ_x уменьшается. Это связано с тем, что линия действия равнодействующей силы резания приближается к середине базовой поверхности в плане (см. рис. 3,*в*).

4. Увеличение силы затяжки ($P_{зат}$) снижает интенсивность нарастания перемещения Δ_x (см. рис. 3,*д*).
5. Зависимость Δ_x от вылета державки (l_0) имеет экстремальный характер (см. рис. 3,*е*).

Настоящее исследование было проведено в связи с доведением РТУ МИРЭА Государственного задания № 075-00701-24-07 от 03.04.2024г. и заключением дополнительного соглашения к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 05.04.2024г. №075-03-2024-077/8 по теме "Исследование методов пассивации поверхностей в процессах механической обработки и эксплуатации" (шифр "Наука")

Список литературы

1. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. 3 изд. М.: Машиностроение, 1976. 440 с.
2. Неразрушающий контроль / Клюев В.В., Кеткович А.А., Крапивин В.Ф. и др, Под ред. Клюева В.В. М.: Машиностроение, 2005. Т.8. 789 с.
3. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. М.: Машиностроение, 2007. 304 с.
4. Лукьянов А.В., Алейников Д.П. Исследование колебаний сил взаимодействия фрезы с заготовкой при повышении скорости вращения шпинделя // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. №4(56). С. 70-82.
5. Нагорный В.В. Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса. Монография В.В.Нагорный, 2016. 242 с.
6. Авдонин Г.Т., Алексеев А.В. Влияние колебаний технологической системы на эксплуатационные характеристики обрабатываемых деталей // Технология машиностроения. 2021. №3. С. 12-13.

Пухальский Владимир Альфредович, канд. техн. наук, puhalya@mail.ru, Россия, Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,

Офицеров Олег Олегович, сотрудник, Россия, Москва, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,

Сидоров Иван Михайлович, канд. техн. наук, начальник отдела, ivan.sidorov0120@yandex.ru, Россия, Москва, МИРЭА – Российский технологический университет

RELIABLE ATTACHMENT OF THE REPLACEABLE POLYHEDRAL PLATE TO THE PIN FOR END MILLING

V.A. Puhalsky, O.O. Officers, I.M. Sidorov

The scientific article presents the results of a study of the influence of structural and technological factors on the movement of the holder and the cutting plate during the associated face milling.

Key words: end milling process, milling, end mill, cutting process, holder, cutting plate.

Pukhalsky Vladimir Alfredovich, candidate of technical sciences, puhalya@mail.ru, Russia, Moscow, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,

Officers Oleg Olegovich, employee, Russia, Moscow, A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,

Sidorov Ivan Mikhailovich, candidate of technical sciences, head of the department, ivan.sidorov0120@yandex.ru, Russia, Moscow, MIREA – Russian University of Technology

УДК 621.793
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-495-496

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛИТЕЙНЫХ ПРЕСС-ФОРМ

С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев, А.А. Калинин, В.В. Воинова

В статье рассмотрены возможности использования защитных износостойких покрытий для повышения долговечности литейных пресс-форм. Установлено, что на степень упрочнения стали в условиях лазерного нагрева, большое влияние оказывает содержание в ней углерода и карбидообразующих элементов. Показано, что максимальное упрочнение наблюдается в стали ШХ15, поскольку в ней имеется повышенное содержание углерода. Выявлено, что при диффузионной металлизации, включающей в качестве исходной операции плазменное напыление покрытия хрома и последующий отжиг в защитной атмосфере водорода при температуре 1200 °С в течение пяти часов на поверхности стальных образцов пресс-форм для литья под давлением формируется диффузионный слой глубиной 20…60 мкм, по строению и характеристикам обеспечивающий улучшение эксплуатационных характеристик материала.

Ключевые слова: покрытия, диффузионная металлизация, лазерная обработка, пресс-форма, упрочнение.

Введение. В литейном производстве ключевым компонентом является форма для отливки, взаимодействие которой с самой отливкой во многом влияет на ее качество, включая точность и состояние поверхности. Форма должна эффективно отводить тепло и содействовать правильной кристаллизации и затвердеванию отливки. Она также обязана выдерживать значительные нагрузки, предотвращая образование усадочных трещин, и обладать достаточной прочностью, устойчивостью к износу и коррозии.

В технологии литья под давлением продолжительность цикла варьируется от 0,5 до 3 минут. Во время этого процесса рабочая поверхность формы нагревается в зависимости от используемого сплава, от 200 °С до 1100 °С. Это вызывает температурные напряжения, которые в случае отливки из алюминия, меди или железа могут достигать уровня текучести материала, что вызывает пластическую деформацию в вязких материалах и трещины в хрупких. Материалы с низкой прочностью и твердостью также подвержены смятию, особенно в местах соединений.

Износ рабочих поверхностей в эксплуатации – это сложный процесс разрушения материала, проявляющийся в изменении размеров и формы объектов. Для предотвращения этого используют износостойкие защитные покрытия, позволяющие минимизировать потери металла и снизить ресурсозатраты, повышая качество, надежность и долговечность техники.

Одним из современных методов упрочнениея поверхностей инструментов является газотермическое нанесение покрытий, пригодное почти для всех известных порошков [1, 2]. Тем не менее, использование плазменных покрытий осложняется их пористостью и слабым сцеплением с основным материалом. Повышение эксплуатационных характеристик покрытий можно достигнуть дополнительной термической обработкой, хотя при этом существует риск разупрочнения деталей [1-3].

В этой связи комплексное расширение научно-исследовательских технологических и эксплуатационных мероприятий по созданию и внедрению износостойких защитных покрытий для упрочнения поверхностей инструмента, повышения работоспособности с целью увеличения сроков их службы, производительности и экономии дефицитных материалов имеет большой научный и практический интерес.

1. Материалы и методы исследования. В качестве объектов исследования были выбраны стали 5ХНМ, 9ХС, ШХ15, применяемые для производства пресс-форм литья под давлением, а также следующие порошковые материалы: ПН85Ю15, ПХМ, карбид вольфрама.

Для исследования процесса упрочнения пресс-форм литья под давлением методом диффузионной металлизации и лазерным излучением были подготовлены образцы размером Ø50×10 мм.

При диффузионной металлизации на поверхность образцов плазменной горелкой наносили покрытия вышеуказанными порошками по следующей технологии: обезжиривание поверхности уйат-спиритом; дробеструйная обработка поверхности (для повышения качества сцепления покрытия с основой); плазменное напыление покрытия. Режимы плазменного напыления приведены в табл. 1.

После диффузионной металлизации образцы пресс-форм подвергались диффузионному отжигу в атмосфере камерной печи типа ОКБ-лабораторная и в защитной атмосфере водорода. После отжига образцы охлаждали на воздухе. Режимы диффузионного отжига приведены в табл. 2.

Для исследования процесса упрочнения энергией лазера образцы пресс-форм из сталей 5ХНМ, 9ХС, ШХ15 с покрытием ПН85Ю15 обрабатывались на лазерной установке, представляющей CO_2-лазер непрерывного действия мощностью 3 кВт с водяным охлаждением.

Несмотря на то, что применявшаяся в опытах аппаратура позволяла получать большие значения удельной мощности, были выбраны те режимы, которые позволяют обеспечить эффективную передачу энергии лазера (табл. 3).

Различную глубину поверхностного расплавления получали за счет изменения в пределах 3,03…6,25 мм/с линейной скорости перемещения образцов относительно сфокусированного пятна лазерного луча.

Располагая образцы, подлежащие поверхностному оплавлению на столе, одновременно обрабатывали сразу все образцы в одинаковых условиях. Образцы устанавливали рядом друг с другом так, чтобы их верхние грани располагались в фокальной плоскости лазерного луча.

С целью определения глубины, характера структурных изменений, распределения микротвердости в поверхностном слое после диффузионного отжига и лазерной обработки на предварительно подготовленных шлифах после травлений растворами азотной кислоты в этиловом спирте и плавиковой кислоты проводили металлографические и дюрометрические исследования.

При проведении экспериментальных исследований образцов после лазерной обработки устанавливали зависимость зон термического влияния (ЗТВ), структурных изменений в материале от энергетических параметров лазерного излучения и скорости обработки.

Исследование проводили на шлифах с помощью микротвердомера ПМТ-3, при нагрузке на индентор 50 г (для образцов, подвергнутых диффузионной металлизации и отжигу) и 100 г (для образцов, подвергнутых лазерной обработке). Металлографические исследования проводили на металлографическом микроскопе МИМ-8.

Таблица 1

Режимы плазменного напыления

Материал покрытия	Толщина покрытия, мм	Напряжение, В	Сила тока, А	Расстояние от среза сопла до изделия, мм	Плазмообразующий газ	Транспортирующий газ	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Расход транспортирующего газа, л/мин	Расход порошка, кг/час	Размер фракции, мкм
ПН85Ю15	0,3	45…50	300…320	100…120	Ar	N_2	35…40	6…9	2,0…3,0	45…100
Карбид вольфрама	0,3	45…50	300…320	100…120	Ar	N_2	35…40	6…9	2,0…3,0	45…100
ПХМ	0,3	50…60	300…350	100…120	Ar	N_2	35…40	6…9	1,0…1,2	40…120

Таблица 2

Режимы диффузионного отжига

Материал основы / покрытия	Толщина покрытия, мм	Атмосфера отжига	Температура, ℃	Время, час
5ХНМ	0,3	печная	1100	3,0
		защитная	1200	5,0
ШХ15	0,3	печная	1100	3,0
		защитная	1200	5,0
9ХС	0,3	печная	1100	3,0
		защитная	1200	5,0

Таблица 3

Режимы лазерной обработки

Удельная мощность, кВт	2,0			1,5		
Скорость, мм/мин	3,03	4,44	6,25	3,03	4,44	6,25

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Обработка покрытий энергией лазера. При обработке лазерным лучом в анализируемых сплавах формируются структуры, представляющие широкий спектр твердых растворов, которые подвержены различной степени распада. Это сопровождается формированием стабильных и метастабильных фаз, в зависимости от скорости охлаждения и химического состава сплава.

Металлографические исследования зон воздействия лазера на сталях марок ШХ15, 9ХС, 5ХНМ выявили наличие «белой» слабо травящейся зоны и зоны термического влияния (ЗТВ). Они также показали, что структура образцов изменяется на границе расплавленной зоны и матрицы основного металла. ЗТВ примыкает непосредственно к зоне расплава. Присутствие расплава в зоне лазерного воздействия при определенных параметрах лазерной обработки позволяет насыщать обрабатываемые материалы различными элементами. Геометрические параметры зоны расплава и ЗТВ варьируются в зависимости от условий облучения (табл. 4).

Оплавление образцов проводилось при различных режимах, включая широкий диапазон скоростей охлаждения. Изменения в структуре могут указывать на снижение температурного градиента относительно скорости затвердевания. Высокая дисперсность компонентов структуры в области оплавления обусловлена высокой скоростью охлаждения. В ходе исследования структуры «белой» зоны были обнаружены два слоя: центральный слой с микротвердостью 2200…2700 МПа и периферийный слой с микротвердостью 6700…7700 МПа.

На рис. 1 представлены графики изменения микротвердости от поверхности вглубь образца после оплавления. Различие в микротвердости между двумя слоями расплавленной зоны обусловлено неравномерным распределением легирующих элементов.

В большинстве легированных сталей при традиционной обработке появляются тонкодисперсные частицы карбидов, таких как MeC, Me_6C_3, $Me_{23}C_6$. Лазерное оплавление способствует растворению крупных частиц первичных карбидов в жидком металле. Структура первого слоя белой зоны после лазерной обработки состоит из феррита и аустенита, без мартенсита, что объясняет пониженную твердость оплавленного слоя.

Таким образом, кривые изменения микротвердости рассматриваемых сталей являются типичными, а размеры различных зон (расплавленной и ЗТВ) зависят от марки стали и условий лазерного облучения. Размеры зоны лазерного воздействия увеличиваются с уменьшением скорости перемещения относительно луча оптической лазерной головки и практически не зависят от содержания углерода и карбидообразующих элементов в стали.

Таблица 4

Результаты измерений геометрических параметров расплавленной зоны и ЗТВ исследуемых образцов сталей 5ХНМ, 9ХС и ШХ15

Удельная мощность, кВт	2,0			1,5		
5ХНМ						
Скорость, мм/мин	3,03	4,44	6,25	3,03	4,44	6,25
Ширина оплавленной зоны, мкм	1750	1700	1200	1400	1350	–
Глубина оплавленной зоны, мкм	700	900	850	300	850	–
Глубина зоны закалки, мкм	900	1000	500	500	850	600
Глубина зоны отпуска, мкм	950	1350	500	900	1000	1300
9ХС						
Удельная мощность, кВт	2,0			1,5		
Скорость, мм/мин	3,03	4,44	6,25	3,03	4,44	6,25
Ширина оплавленной зоны, мкм	2250	1900	2000	2150	2250	2450
Глубина оплавленной зоны, мкм	900	1050	1100	900	800	1000
Глубина зоны закалки, мкм	1050	800	1350	1150	1100	1200
Глубина зоны отпуска, мкм	1400	500	450	750	400	500
ШХ15						
Удельная мощность, кВт	2,0			1,5		
Скорость, мм/мин	3,03	4,44	6,25	3,03	4,44	6,25
Ширина оплавленной зоны, мкм	2000	1600	1900	2650	2000	–
Глубина оплавленной зоны, мкм	500	300	350	450	400	–
Глубина зоны закалки, мкм	800	650	800	850	800	–
Глубина зоны отпуска, мкм	250	300	400	250	300	–

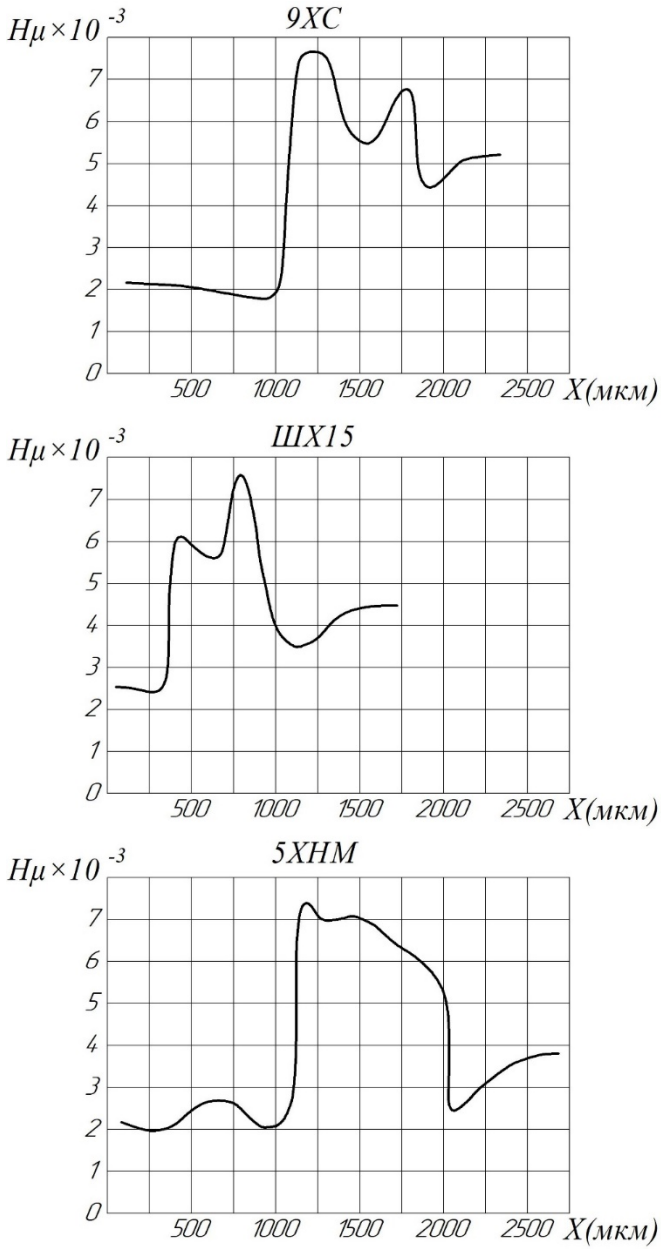


Рис. 1. Изменение микротвердости по глубине оплавленного слоя покрытия ПН85Ю15: Р = 1,5кВт, V = 4,44 мм/с

Таким образом кривые изменения микротвердости исследуемых сталей являются типичными, длина и ширина различных областей (расплавленной, ЗТВ) определяется маркой стали (химическим составом) и выбранными условиями лазерного облучения. Размеры зоны лазерного воздействия увеличиваются с уменьшением скорости перемещения относительно луча оптической лазерной головки и практически не зависят от содержания углерода и карбидообразующих элементов в стали.

2.2. Диффузионная металлизация и диффузионный отжиг. Далее на образцах, изготовленных из сталей 9ХС, ШХ15 и 5ХНМ исследовали возможность формирования диффузионного слоя из плазменнонапыленного покрытия при отжиге металлизированных образцов при температурах 1100 и 1200 °С. Время отжига составляло 2…6 часов. Результаты металлографического и дюрометрического анализов образцов из сталей 9ХС, ШХ15, 5ХНМ после диффузионной металлизации и диффузионного отжига приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты металлографического и дюрометрического анализов образцов с покрытиями из хрома и карбида вольфрама

Материал покрытия	Хром					
Атмосфера отжига	Защитная			Печная		
Материал основы	5ХНМ	9ХС	ШХ15	5ХНМ	9ХС	ШХ15
Характеристика диффузионного слоя	Непрерыв. H_μ = 3000…4360 МПа	Непрерыв. H_μ = 3000…4200 МПа	Непрерыв. H_μ = 4800 МПа	Прерыв.	Отсутст.	Отсутст.
Материал покрытия	Карбид вольфрама					
Атмосфера отжига	Защитная			Печная		
Материал основы	5ХНМ	9ХС	ШХ15	5ХНМ	9ХС	ШХ15
Характеристика диффузионного слоя	Отсут.	Прерыв.	Отсут.	Отсут.	Отсут.	Отсут.

Исследования показали, что при отжиге в защитной атмосфере образуются диффузионные слои на образцах с хромовым покрытием, в то время как на образцах с карбидом вольфрама такой слой не появляется. На скорость образования хромированного слоя значительное воздействие оказывают углерод и легирующие элементы. Углерод замедляет перемещение хрома из-за их высокой взаимной химической активности.

Легирующие элементы влияют на образование диффузионного слоя изменением термодинамической активности и подвижности хрома и углерода. Углерод замедляет движение хрома, но добавление карбидообразующих металлов, таких как молибден, ванадий и титан, способствует стабилизации углерода и увеличению толщины хромированного слоя.

При сравнении диффузионных слоев образующихся на сталях марок ШХ15 и 5ХНМ видно, что в стали ШХ15, с более высоким содержанием хрома и углерода, толщина слоя составляет 20 мкм, тогда как в стали 5ХНМ – 50 мкм. Микротвердость диффузионных слоев несколько выше твердость матрицы основного металла. Их микроструктура, полученная после плазменного напыления и последующего отжига, показана на рисунке 2.

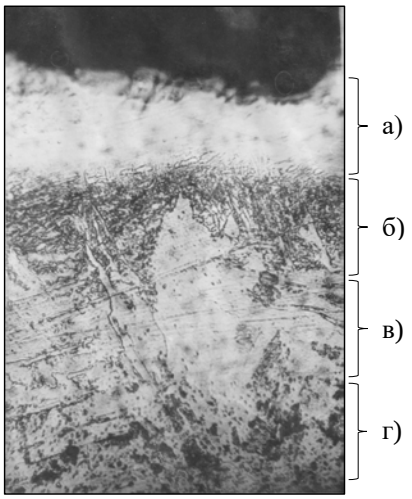


Рис. 2. Микроструктура поверхности стали 5ХНМ после плазменного напыления хромового покрытия и отжига при 1200 °С в течении пяти часов в защитной атмосфере водорода: а – диффузионный слой; б – эвтектоидная зона; в – обедненная зона; г – матрица

На изображении четко видны различные зоны слоев, включая светлую нетравящуюся прослойку, принимаемую за толщину слоя. Переходная эвтектоидная зона образована из-за встречной диффузии углерода, которая быстрее, чем у хрома. Около эвтектоидной зоны, обогащенной углеродом, располагается зона с низким содержанием углерода, почти ферритная, постепенно переходящая в структуру матрицы основного металла.

Применение хромового покрытия с высокой плотностью и адгезией улучшает диффузию хрома в поверхностные слои заготовок, обогащая их. Это ведет к созданию на поверхности стали диффузионного слоя в виде однородного твердого раствора хрома в железе, что улучшает износостойкость и коррозионную стойкость форм, повышая их эксплуатационные качества.

Выводы:

1. Выявлено, что степень упрочнения стали при воздействии лазерного излучения, в значительной степени зависит от содержания углерода и элементов, образующих карбиды. Показано, что наибольшее упрочнение наблюдается в стали марки ШХ15.

2. Установлено, что при диффузионной металлизации, включающей плазменное покрытие хромом и последующий отжиг в водородной атмосфере при температуре 1200 °С в течение пяти часов, на поверхности стальных образцов пресс-форм для литья под давлением образуется диффузионный слой глубиной 20…60 мкм. Этот слой по своей структуре и характеристикам улучшает эксплуатационные свойства материала.

Полученные данные могут применяться для установления закономерностей в поведении слитковых, порошковых и композитных материалов разной природы с высокой дисперсностью фаз и структурных составляющих в различных условиях и состояниях [4-10].

Список литературы

1. Физико-механические и эксплуатационные свойства защитных покрытий / В.К. Зеленко, Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, В.М. Власов. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 1999. 213 с.

2. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.

3. Когезионная прочность металлических и интерметаллических порошковых плазменных покрытий / Н. Н. Сергеев, М. В. Ушаков, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, С. Н. Кутепов, О. В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 8. С. 62-79.

4. Применение технологии изготовления «корковым» способом формообразующих вставок для литья под давлением медных сплавов / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 3(78). С. 67-83.

5. Влияние процесса оплавления на когезионную прочность порошковых плазменных покрытий / Н. Н. Сергеев, М. В. Ушаков, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, С. Н. Кутепов, О. В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 2. С. 430-441.

6. Закономерности формирования структуры частиц порошковых композиций на основе алюминия, получаемых механическим реакционным легированием / В. Н. Гадалов, А. Е. Гвоздев, А. Г. Колмаков, И. В. Ворначева, С. Н. Кутепов, Е. А. Ельников, Д. С. Алымов, Д. И. Нестеров // Материаловедение. 2019. № 7. С. 38-42.

7. Увеличение износостойкости пористых газотермических покрытий путем химико-термической обработки / С. Г. Чулкин, А. Д. Бреки, А. А. Шатульский, А. Е. Гвоздев, С. Н. Кутепов, Е. В. Агеев // Вестник «Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева». 2020. № 1(52). С. 71-77.

8. О формировании диффузионного защитного слоя на деталях пресс-форм / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12. № 1. С. 25-40.

9. Использование защитных износостойких покрытий для повышения долговечности литейных пресс-форм / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, И. В. Минаев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12. № 2. С. 8-25.

10. Влияние наплавленного защитного слоя на упругие и неупругие характеристики материала основы / М. В. Ушаков, С. Н. Кутепов, Д. С. Клементьев, А. А. Калинин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 453-461.

Кутепов Сергей Николаевич, канд. пед. наук, доцент, kutepov.sergei@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Клементьев Денис Сергеевич, аспирант, denis.klementev.93@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Калинин Антон Алексеевич, заместитель директора по коммерческим вопросам издательства ТулГУ, antony-ak@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Воинова Валерия Владленовна, студент, voinovalerya26@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого

THE USE OF POWDER COATINGS TO ENHANCE THE DURABILITY OF FOUNDRY MOLDS

S.N. Kutepov, D.S. Klement'yev, A.A. Kalinin, V.V. Voinova

The article discusses the possibilities of using protective wear-resistant coatings to increase the durability of foundry molds. It was found that the degree of hardening of steel under laser heating conditions is greatly influenced by the content of carbon and carbide-forming elements in it. It is shown that the maximum hardening is observed in steel ShKh15, since it has an increased carbon content. It was revealed that during diffusion metallization, which includes as an initial operation plasma spraying of a chromium coating and subsequent annealing in a protective hydrogen atmosphere at a temperature of 1200 °C for five hours, a diffusion layer with a depth of 20...60 microns is formed on the surface of steel samples of injection molds, according to the structure and characteristics of the-improving the performance of the material.

Key words: coatings, diffusion metallization, laser treatment, mold, hardening.

Kutepov Sergey Nikolaevich, candidate of pedagogical science, assistant professor, kutepov.sergei@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Klement'yev Denis Sergeevich, postgraduate, denis.klementev.93@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Kalinin Anton Alekseevich, Deputy Director for Commercial Affairs of TulSU Publishing House, antony-ak@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Voinova Valeria Vladlenovna, student, voinovalerya26@gmail.com, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University

УДК 621.763:621.77:539.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-500-501

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ МАТЕРИАЛА В ИЗДЕЛИЯХ ТЕХНОЛОГИИ SLM В ХОДЕ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ

В.А. Коротков, А.Н. Чуканов, Е.В. Цой, А.А. Фролов

Приведен анализ развития упрочнения на участках деформации в образцах порошкового жаропрочного сплава типа Inconel 718, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления (SLM), при их растяжении. Исследована роль технологической анизотропии образцов на характер изменения коэффициента анизотропии и неоднородность характеристик механических свойств в различных микрообъёмах образца. На основе анализа результатов фотофиксации изменения размеров ячеек делительной сетки, нанесённой на образец, и диаграмм деформации, полученных при растяжении, выполнили расчёт коэффициентов анизотропии R. Зафиксировали линейный характер роста коэффициента анизотропии образцов в ходе нагружения. На основе значений истинных напряжений и деформаций, полученных в ходе синхронизации цифровых изображений делительной сетки от времени испытаний, с параметрами кривых нагружения предложено выражение и выполнен расчёт показателя неоднородности материала. Высказано предположение о взаимосвязи неоднородности материала образцов с их анизотропией.

Ключевые слова: Inconel 718, SLM, коэффициент анизотропии, деформация растяжения, показатель локальной неоднородности материала

Введение. Анизотропия механических свойств изделий аддитивных технологий (АТ) послойного (селективного) лазерного сплавления (*SLM*) проявляется в различии пределов текучести $\sigma_{0,2}$, временного сопротивления разрыву $\sigma_в$, относительного удлинения δ и других характеристик в изделиях, выращенных в разных направлениях относительно платформы 3*d*-принтера. Природа анизотропии механических свойств изделий *SLM* производства и её влияние на их эксплуатацию активно исследуется учёными и практиками [1-3]. Одной из её причин считают наличие локальных зон концентрации внутренних напряжений (ЛЗКН) и их строчечное расположение [4]. Такими зонами могут являться различного рода несплошности (поры, трещины) и неметаллические включения, характерные для технологии *SLM*. Указанные ЛЗКН, как элементы неоднородности материала, становятся в ходе нагружения очагами зарождения микропластичности, стимулирующей развитие деформации в объёме изделия [5]. По всей видимости, неоднородность материала изделия *SLM* связана с анизотропией его свойств и определяет характер их изменения в ходе эксплуатации. Этот процесс может негативно сказываться на работоспособности изделий, приводя к потере их геометрической стабильности и разрушению.

В изучение природы указанной взаимосвязи, в том числе в образцах порошковых сплавов, изготовленных методом *SLM*, успешно зарекомендовал себя анализ поведения коэффициента анизотропии (показателя Ланкфорда - *R*) [6]. Технология определения *R* при помощи фотофиксации локальных деформаций [7,8] позволяет изучать характер и скорость упрочнения, как во всём изделии, так и в его локальных микрообъёмах [5]. Наряду с этим анализ *R* даёт возможность оценить влияние анизотропии на формирование неоднородности материала в макро- и микрообъёмах изделия.

Цель работы - выявление взаимосвязи характера изменения коэффициента анизотропии с формированием локализованной неоднородности в образцах *SLM* технологии на основании результатов испытаний на растяжение.

Материал и методика испытаний. Объектами исследования являлись образцы (100х10х2мм) порошкового жаропрочного сплава 08ХН53БМТЮ (аналог *Inconel* 718), изготовленные по технологии *SLM* в вертикальном направлении относительно платформы 3*d*-принтера *SLM* 280 2.0*HL*.

В расчетной зоне длины образцов по всей поверхности методом лазерной гравировки наносили делительную сетку [8,9] с ячейками размером 1х1 мм (рис.1). Каждый ряд ячеек сетки рассматривали как поперечное сечение, размеры которого и начальная площадь известна. Исследовали локальный участок образца объёмом равным начальной площади поперечного сечения, умноженному на размер ячеек ряда в продольном направлении.

Образцы подвергали одноосному растяжению на испытательной машине Р5-ПК (ГОСТ 11701-84) с максимальным номинальным усилием 50 kH с постоянной скоростью перемещения захватов 5 мм/мин на воздухе при комнатной температуре с записью кривой «нагрузка-перемещение».

Параллельно с растяжением образцов вели фотофиксацию их поверхности при помощи специальной системы, состоявшей из фотоаппарата *Canon EOS R6* (с фокусным расстоянием 24 -105 мм) с разрешением 20.1 Мпикс и объектива *Ef 24-105 f/4*. Данная система обеспечивала получения цифровых изображений с плотностью пикселей 900 пикс/мм^2. Фотосъемку испытаний проводили в двух временных режимах: с интервалом между кадрами в 5 и 10 сек [8]. Фотофиксацию испытаний начинали одновременно с началом записи машинной кривой растяжения.

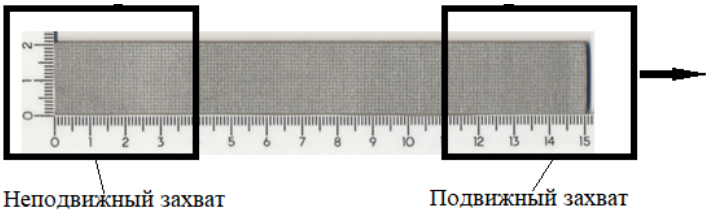


Рис. 1. Расчетная длина образца с делительной сеткой между захватами испытательной машины

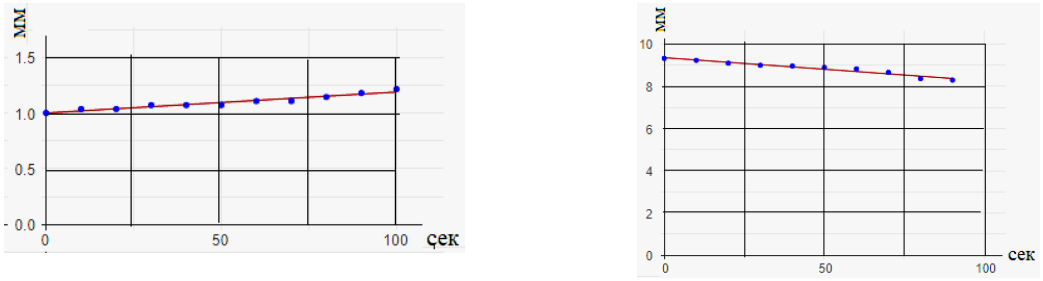
Локальные деформации поверхности образцов определяли с помощью анализа цифровых изображений, полученных в ходе фотофиксации эксперимента. Полученные цифровые изображения обрабатывали в многофункциональном растровом графическом редакторе *Adobe Photoshop*.

Используя внутренние инструменты ПО, определяли размеры по длине и ширине отдельных ячеек делительной сетки в пикселях и методом АЦП устанавливали их размеры в единицах длины [7,8].

Коэффициенты анизотропии определяли по индивидуальным размерам (по длине и ширине) ячеек заданного сечения делительной сетки. Каждое поперечное сечение образца имело 10 ячеек по ширине и одну по длине. Номер исследованных поперечных сечений №№8,12,16 соответствовал расстоянию в миллиметрах этого сечения от неподвижного захвата испытательной машины (рис.1). Использовали данные о начальных (до растяжения) размерах ячеек заданного сечения по ширине b_o и длине l_o и их конечных размерах b_k и l_k в этом сечении в процессе растяжения через интервал времени 10 сек. На их основе рассчитывали суммарные логарифмические деформации ячеек в заданных поперечных сечениях [9,10].

Результаты экспериментов. В ходе проведения статистической обработки результатов измерения с использованием метода наименьших квадратов (МНК) определяли закономерность изменения размеров заданного поперечного сечения.

На рис. 2 приведены типичные графики изменения размера ячеек поперечного сечения № 8 в процессе растяжения.



а ***б***

Рис. 2. Изменение длины (а) и ширины (б) ячеек поперечного сечения №8 от времени растяжения

Графики зависимостей l_i и b_i от времени t для ячеек сечений №№12 и 16 имели вид аналогичный рис.2.

Анализ результатов экспериментов. Из рис. 2 видно, что в процессе растяжения длина всех ячеек монотонно и равномерно увеличивается, а ширина поперечных сечений монотонно и равномерно уменьшается. Этот процесс с погрешностью аппроксимации не более 1% описали линейными уравнениями. Например, для ячеек сечения №12: типа: $l_i = 0{,}0017t + 1{,}0016$ и $b_i = 9{,}3284 - 0{,}0112t$, (1)
где t – время процесса растяжения.

Уравнения аппроксимации изменения размеров поперечных сечений в процессе растяжения образца позволили с использованием уравнений (1) определить истинные (логарифмические) деформации сечений продольном ε_{li} и поперечном ε_{bi} в направлениях в любой момент растяжения. Например, логарифмическую деформацию ε_{li} в продольном направлении в сечениях №№ 8, 12, 16 определяли по уравнениям (2-4):

в сечении №8

$$\varepsilon_{l8} = ln\frac{l_i}{1} = ln\frac{0{,}0019t+1}{1}, \quad (2)$$

в сечении №12

$$\varepsilon_{l12} = ln\frac{l_i}{1{,}0016} = ln\frac{0{,}0017t+1{,}0016}{1{,}0016}, \quad (3)$$

в сечении №16

$$\varepsilon_{l16} = ln\frac{l_i}{1{,}0032} = ln\frac{0{,}0018t+1{,}0032}{1{,}0032}. \quad (4)$$

Аналогично рассчитывали логарифмические деформации в поперечном направлении ε_{bi} по уравнениям (5-7):

в сечении №8

$$\varepsilon_{b8} = ln\frac{b_o}{b_i} = \frac{9{,}5394}{9{,}5394-0{,}0103t}, \quad (5)$$

в сечении №12

$$\varepsilon_{b12} = ln\frac{b_o}{b_i} = \frac{9{,}5182}{9{,}5182-0{,}0097t}, \quad (6)$$

в сечении №16

$$\varepsilon_{b16} = ln\frac{b_o}{b_i} = \frac{9{,}5442}{9{,}5442-0{,}0100t}. \quad (7)$$

Коэффициенты анизотропии в указанных сечениях определяли по формуле (8) [9,10]

$$R = \varepsilon_{bi}/(\varepsilon_{li} - \varepsilon_{bi}). \quad (8)$$

Результаты расчёта коэффициентов анизотропии в поперечных сечениях в заданные моменты растяжения с интервалом времени 10 сек приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты анизотропии в поперечных сечениях в процессе растяжении плоского образца

Время растяжения *t*, сек	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R_8	1,38	1,41	1,46	1,51	1,57	1,63	1,70	1,76	1,83	1,91
R_{12}	1,24	1,61	1,67	1,73	1,79	1,86	1,93	2,01	2,09	2,18
R_{16}	1,67	1,75	1,80	1,88	1,96	2,03	2,12	2,21	2,31	2,42

Графики изменения коэффициентов анизотропии R от истинной деформации ε_i представлены на рис. 3. В ходе нагружения R монотонно растёт во всех исследованных сечениях (рис. 3).

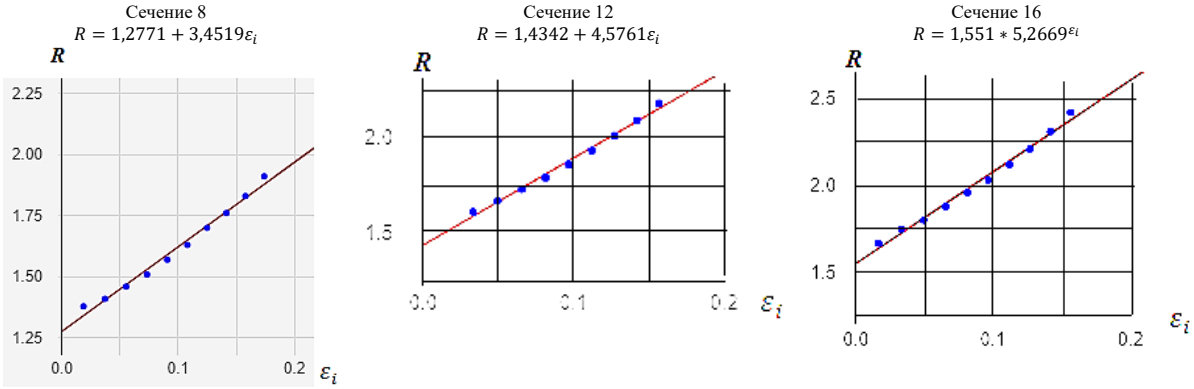


Рис. 3. Изменение коэффициента анизотропии R в поперечных сечениях в зависимости от истинной деформации поперечного сечения

В процессе растяжения образца происходит упрочнение его материала. Характер деформационного упрочнения определяли на основе анализа кривой упрочнения, построенной в координатах: истинное напряжение σ_i истинная деформация ε_i. Истинные напряжения определяли как отношение нагрузки, измеренной по графику «нагрузка-перемещение», к площади поперечного сечения образца в данный момент испытания F_i.

На рис. 4 приведён график «нагрузка-перемещение», полученный при растяжении рассматриваемого образца со скоростью перемещения подвижного захвата испытательной машины V=5 мм/мин.

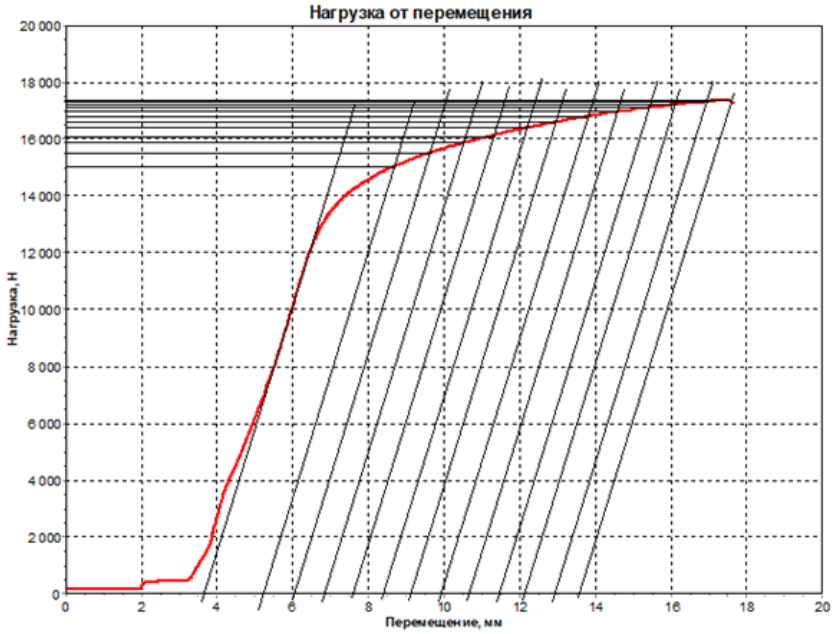


Рис. 4. График «нагрузка-перемещение» растяжения образца порошкового сплава Inconel 718

Из рис. 4 видно, что подвижный захват испытательной машины в момент пластического деформирования образца переместился на 9,85 мм и, следовательно, при скорости перемещения подвижного захвата испытательной машины V=5 мм/мин время растяжения t составило 1,97 мин или 118 сек.

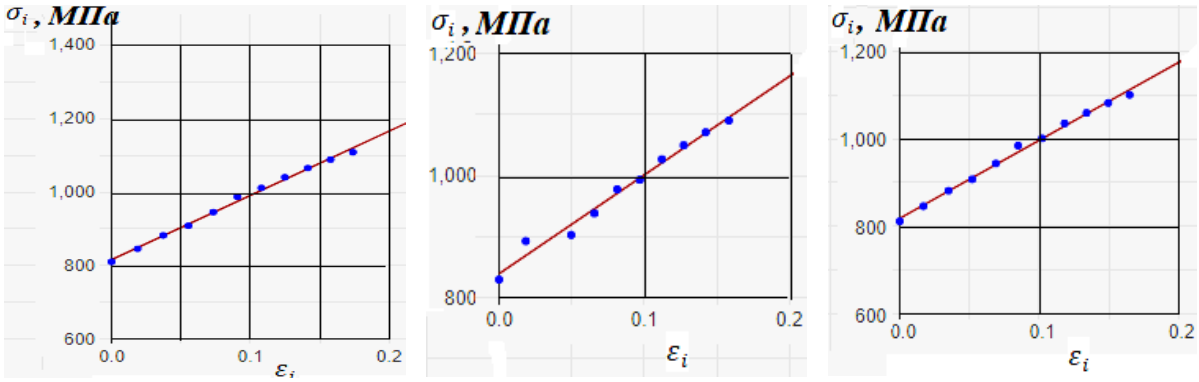
Процесс видеофиксации изменения размеров ячеек поперечных сечений занимал время 130 сек. В интервале этого времени в течение 100 сек наблюдали изменение размеров ячеек сечений.

Для синхронизации момента фиксации размеров с графиком «нагрузка-перемещение» учитывали особенности деформирования различных поперечных сечений, расположенных на участках расчётной длины образца. Если поперечные сечения были расположены вне зоны образования «шейки» и последующего разрушения, то деформации в этих сечениях прекращаются одновременно в момент локализации деформаций в поперечных сечениях около шейки. В области же образования шейки пластическое течение материала образца продолжалось до его разрушения. Учитывая эту особенность пластического деформирования, на графике рис. 4 откладывали отрезок перемещения подвижного захвата, зафиксированный в течение 100 сек от момента начала образования шейки в сторону начала пластического деформирования и делили этот участок графика на интервалы перемещения подвижного захвата, соответствующие периодам 10 сек.

На рис. 4 показаны интервалы перемещения подвижного захвата, соответствующие времени 10 сек. По оси нагрузки определяли её величину P_i для каждого интервала растяжения.

Для нахождения истинного напряжения σ_i определяли площадь поперечного сечения образца и соответствующую ему нагрузку в заданный момент времени растяжения (t_i).

На основе полученных данных строили кривые упрочнения (рис. 5) для изотропного материала и находили уравнения их линейной аппроксимации методом наименьших квадратов (МНК) (14-16).



а *б* *в*

Рис. 5. Кривые упрочнения сечений: №8 (а); №12 (б); №16 (в)

Уравнения аппроксимации кривых упрочнения (рис. 5) в сечениях:

в сечении №8

$$\sigma_{i8} = 1682{,}05\varepsilon_i + 802{,}7 \quad (9)$$

в сечении №12

$$\sigma_{i12} = 1755{,}0\varepsilon_i + 805{,}1 \quad (10)$$

в сечении №16

$$\sigma_{i16} = 1745{,}11\varepsilon_i + 808{,}4 \quad (11)$$

Средняя ошибка аппроксимации МНК уравнений (9-11) составила А=0,53; 0,91 и 0,5 %, соответственно.

На основе полученных уравнений аппроксимации (9-11) кривых упрочнения материала в различных поперечных сечениях образца определяли изменение неоднородности материала в процессе растяжения при фиксированных значениях логарифмических деформаций [11].

За показатель неоднородности материала принимали величину, равную *Hi* (12):

$$\mathrm{H}i = \left|\frac{\sigma_{i\,max} - \sigma_{i\,min}}{\sigma_{i\,\mathrm{ср}}}\right| 100, \ \% \quad (12)$$

где $\sigma_{i\,\mathrm{ср}}$- среднее значение истинного напряжения в рассматриваемых сечениях (№№8, 12, 16); $\sigma_{i\,max}$ и $\sigma_{i\,min}$ - истинные максимальное и минимальное напряжение в отдельном сечении при фиксированных значениях логарифмической деформации.

В табл. 2 приведены показатели неоднородности материала при различных фиксированных значениях логарифмической деформации.

Таблица 2

Показатели неоднородности материала

Значения ε_i	0,05	0,10	0,15	0,20
Истинное напряжение, МПа				
сечение №8	886,8	970,9	1055,0	1139,1
сечение №12	892,9	980,6	1068,4	1156,1
сечение №16	895,7	982,9	1070,2	1157,4
$\sigma_{\mathrm{ср}}$, МПа	891,8	978,1	1064,5	1150,9
Показатель неоднородности *Hi*, %				
Hi ср.	1,00	1,22	1,43	1,59

Полученные в табл.3 результаты позволили построить графики изменения показателя неоднородности и истинных напряжений в ходе растяжения (рис. 6).

Данные табл. 2 иллюстрируют, что для изотропного материала показатель неоднородности H_i увеличивается в зависимости от величины деформации. Отмечен монотонный характер роста параметра неоднородности в ходе деформации образцов исследованного сплава.

Величина показателя неоднородности в ходе деформации повышалась в диапазоне от 0,05 до 0,20 отн. Ед. истинной деформации. Это увеличение показателя неоднородности механических свойств для исследуемого сплава не превышало 2%. Установлено, что с ростом истинной деформации ε_i линейно увеличиваются истинное напряжение σ_{icp}, коэффициент анизотропии R и показатель неоднородности H_i (рис. 6)

Сделан вывод о необходимости уточнённого расчёта показателя неоднородности анизотропного материала для учёта вклада в него технологической анизотропии, формирующейся в ходе процесса SLM, в образцах исследованного сплава *Inconel 718.*

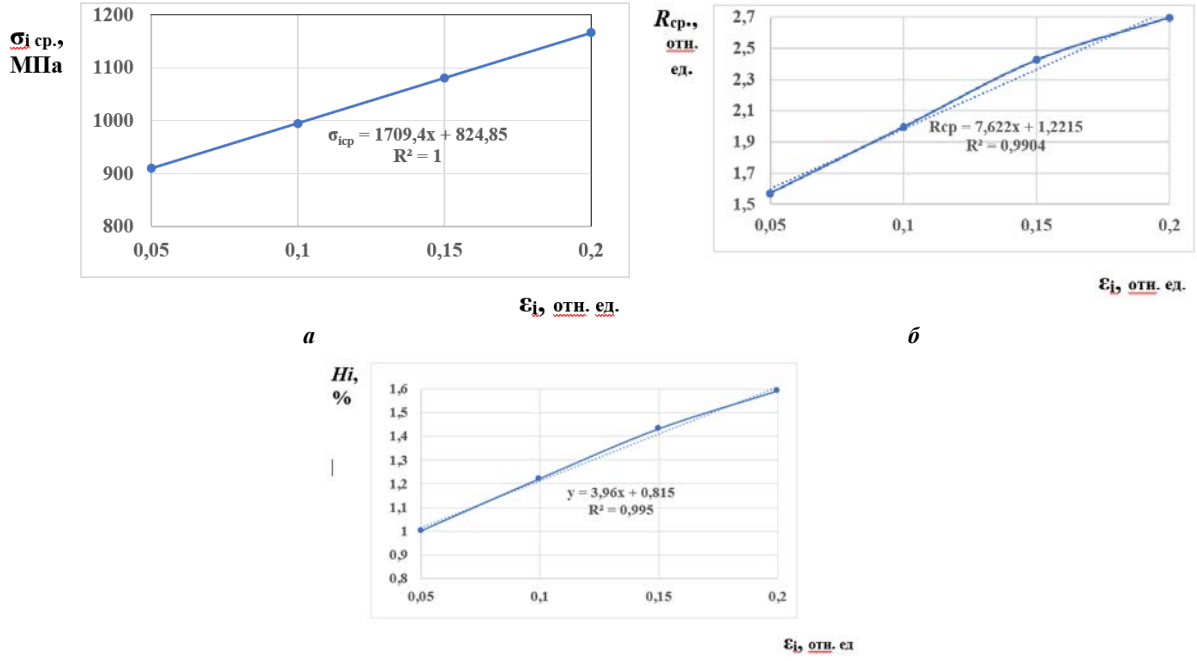


Рис. 6. Изменение истинных σ_i (а), R_{cp}. (б)и H_i (в) от истинных деформации ε_i

Заключение:

1. Использованный способ фотофиксации процесса растяжения позволил с высокой точностью определять как характеристики анизотропии (R), так и неоднородность развития пластического течения материала образца в различных его локальных участках в процессе растяжения.

2. Установлено (табл. 1), что в исследуемых микрообъёмах поперечных сечений исследованный сплав имеет анизотропию механических свойств, характеризуемую коэффициентами анизотропии R, которые индивидуальны для каждого поперечного сечения и монотонно возрастают в процессе растяжения образца.

3. Изменение коэффициента анизотропии R от истинной деформации коррелировало с зависимостью роста σ_i (ε) в исследованных сечениях. Скорость роста R немонотонно зависела от расстояния исследованных сечений от места локализации деформации.

4. Кривые упрочнения материала образца при растяжении имели линейный характер.

5. Был предложено аналитическое выражение для расчёта показателя неоднородности механических свойств материала образца и зафиксирован равномерный линейный рост показателя в ходе растяжения.

6. Сделан вывод о необходимости уточнённого расччёта показателя неоднородности с учётом технологической анизотропии при SLM.

Благодарности. Представленные в данной статье исследования выполнены на средства гранта 2022 г. по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» по научному проекту: «Волновая деформация и ее взаимосвязь с ортотропией структуры и физико-механических свойств в изделиях селективного лазерного сплавления» (соглашение № 23-29-00433 от 13.01.2023 г.) (*https://rscf.ru/project/№ 23-29-00433/*).

Список литературы

1. Kunze K., Etter T., Grässlin J., Shklover V. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM)// Mater. Sci. Eng. A. 2015. Vol. 620. P. 213-222.

2. Song B., Dong S., Coddet P., Liao H., Coddet C. Fabrication of NiCr alloy parts by selective laser melting: columnar microstructure and anisotropic mechanical behavior//Mater. and Design. 2014. Vol. 53. P. 1-7.

3. Popovich A. A., Sufiiarov V.Sh., Borisov E.V., Polozov I.A. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by SLM and subsequent heat treatment // Key Eng. Mater. 2015. Vol. 651-653 Pp. 665-670.

4. Чуканов А.Н. Анизотропия физико-механических свойств при послойном лазерном синтезе // «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов», посвящ. 150-ю акад. А.А. Байкова: Сб. научн. статей МНПК. (18.09.2020 г); Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. С. 244-247.

5. Чуканов А.Н., Добровольский Н.Н., Цой Е.В., Яковенко А.А. Математические методы наблюдения волновых процессов при деформации изделий 3d технологии» // Известия Юго-Западного государственного университета. Техника и технологии. 2023. Т.13 (4). С. 32 - 42.

6. Чуканов А.Н., Яковенко А.А., Цой Е.В., Гончаров С.С. Коэффициент Ланкфорда и скорость деформации в изделиях селективного лазерного сплавления // 2 Всеросс. нац. научно-техн. конф. «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (ТМ-05)» Сб. научн. тр. (11-12.04.2024 г.). Воронежский гос. техн. ун-т, г. Воронеж: ВГТУ, 2024. С. 382-387.

7. Чуканов А.Н., Цой Е.В., Фролов А.А. Использование фотограмметрии в технологической подготовке обучающихся вузов // Современные материалы, техника и технологии, 2024. № 2(53). С. 43-48.

8. Чуканов А.Н., Цой Е.В., Фролов А.А. Разработка технологии регистрации и анализа локализованной деформации материалов // Современные материалы, техника и технологии, 2024. № 2(53). С. 49-51.

9. Чуканов А.Н., Коротков В.А., Яковенко А.А., Цой Е.В., Фролов А.А. Определение коэффициента анизотропии и скорости локальной деформации в аддитивных сплавах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 3. С. 224 - 229.

10. Чуканов А.Н., Коротков В.А., Яковенко А.А., Цой Е.В., Фролов А.А. Характер упрочнения аддитивных сплавов высокой прочности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 4. С. 421-426.

11. Чуканов А.Н., Коротков В.А., Яковенко А.А., Цой Е.В., Фролов А.А. Влияние анизотропии на характер упрочнения в аддитивных сплавах высокой прочности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14. №3. С. 19-29. DOI: 10.21869/2223-1528- 2024-14-3-19-29.

Коротков Виктор Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, vak-2003@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чуканов Александр Николаевич, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, alexchukanov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого университет,

Цой Евгений Владимирович, аспирант, tsoyev@tsput.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого университет,

Фролов Артём Алексеевич, студент, froloff2003@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого университет

DETERMINATION OF LOCAL MATERIAL HETEROGENEITY IN SLM TECHNOLOGY PRODUCTS DURING THE TENSILE TESTS

V.A. Korotkov, A.N. Chukanov, E.V. Tsoi, A.A. Frolov

The analysis of the development of hardening at the deformation sites in samples of a porous heat-resistant alloy of the Inconel 718 type, manufactured using the technology of selective laser fusion (SLM), during their stretching is presented. The role of the technological anisotropy of samples on the nature of changes in the anisotropy coefficient and the heterogeneity of the characteristics of mechanical properties in various micro-volumes of the sample is investigated. Based on the analysis of the results of photofixation of changes in the size of the cells of the measuring grid applied to the sample and the deformation diagrams obtained during stretching, the anisotropy coefficients R were calculated. The linear nature of the increase in the anisotropy coefficient of the samples during loading was recorded. Based on the values of the true stresses and deformations obtained during the synchronization of digital images of the dividing grid from the test time, an expression is proposed with the parameters of the loading curves and the calculation of the material inhomogeneity is performed. It is suggested that the heterogeneity of the sample material is related to their anisotropy.

Key words: Inconel 718, SLM, anisotropy coefficient, tensile strain, index of local heterogeneity of the material.

Korotkov Viktor Anatolievich, candidate of technical sciences, docent, vak_2003@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Chukanov Alexander Nikolaevich, doctor of technical sciences, docent, leading researcher, alexchukanov@yandex.ru, Russia, Tula, L.N. Tolstoy Tula State Pedagogical University,

Tsoi Evgeny Vladimirovich, postgraduate, tsoyev@tsput.ru, Russia, Tula, L.N. Tolstoy Tula State Pedagogical University,

Frolov Artiom Alekseevich, student, froloff2003@yandex.ru, Russia, Tula, L.N. Tolstoy Tula State Pedagogical University

УДК.67.019
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-506-507

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОСИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОПОРНЫХ УЗЛОВ

А.А. Гончаров, В.М. Утенков, В.А. Иванов

В статье приведен новый метод повышения эксплуатационной надёжности вращающихся цементных печей. Основой метода является комплекс диагностических и контрольных процедур, которые проводятся без останова и разгрузки печи, т.е. в горячем состоянии. На основании результатов выверки проводится механическая наладка печи для устранения выявленных при диагностике отклонений геометрической оси печи и дефектов основных узлов. Описанные в статье методы определения положения печи в горизонтальной и вертикальной плоскостях, радиального и торцевого биения основных опорных узлов, проверки состояния приводов, гидроупоров, корпуса печи и построения компьютерной модели печного агрегата позволяют провести качественную механоналадку и обеспечивают повышение производительности оборудования.

Ключевые слова: *диагностика, вращающаяся печь, бандажи, ролики, гидроупоры, горячая выверка, обечайка, венцовая шестерня, соосность, механическая наладка.*

В настоящее время вопросы технического обслуживания производственного оборудования особенно актуальны. При значительных объёмах строительства в стране обеспечение надёжной и бесперебойной эксплуатации вращающихся цементных печей является своевременной и важной задачей.

Вращающиеся печи применяются в различных отраслях промышленности: цементной, металлургической, химической и др. Их широкое распространение объясняется высокой производительностью, сравнительной простотой конструкции, а также полной механизацией и автоматизацией происходящих в них процессов. В развитии их конструкций заметна тенденция постоянного увеличения габаритов. Это повышает требование к их эксплуатационной надежности, для обеспечения которой необходим правильный монтаж вращающейся печи: ось ее вращения должна быть прямолинейной; оси вращения опорных роликов-параллельными оси вращения печи, углы наклона печи и фундаментных рам должны соответствовать друг другу.

Для восстановления оси вращения цементной печи применяются методы механической обработки, в основе которых используется процесс шлифования с применением специально разработанной установки, изображенной на Рис. 1.

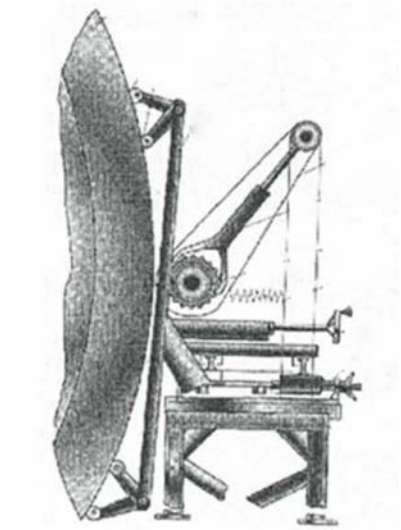


Рис. 1. Установка для шлифования цилиндрических деталей

Оценку геометрических параметров крупногабаритных объектов, в том числе производственного оборудования, в основном проводят с использованием геодезических методов. Такой мониторинг является достаточно сложной и трудоёмкой задачей. Исследуемые объекты отличаются сложной конструкцией, некоторые из них имеют длину до 200м (в т.ч. вращающиеся печи) и эксплуатируются в условиях вибраций и высоких температур. Применяемые методы геодезической выверки оси вращения печи не гарантируют в дальнейшем при эксплуатации удовлетворительного распределения опорных нагрузок по следующим причинам:

- точность геодезической выверки оценивается ±5мм, тогда как требуется ±1мм;
- не учитываются деформации опорных поперечных сечений под действием нагрузок, в частности смещение положения оси вращения относительно верхней точки бандажа, по которому производится выверка;
- не учитываются изменения положения оси вращения нагретой печи по сравнению с холодной.

В настоящее время различают два принципиально разных способа выверки печей.

Это традиционный «холодный способ» (с остановом и разгрузкой печи), который не учитывает температурных и динамических воздействий, и инновационный «горячий способ», при котором выверка производится без останова и разгрузки печи. В нашей стране второй метод до недавнего времени практически не использовался, хотя за рубежом «горячая выверка» в последние 10-15 лет находит все более широкое применение.

В настоящей статье представлен метод определения прямолинейности оси вращающейся печи, именуемый «горячей выверкой», что составляет основу диагностического комплекса, который позволяет определить взаимное расположение корпуса печи, опорных бандажей, роликоопор, главного привода печи, выявить дефекты и отклонения для последующего устранения обнаруженных несоответствий и наладки работы оборудования.

Инструментальная «горячая» выверка печи позволяет определить положение оси вращения печного агрегата и является базовой частью каждой секции. Ось вращения позиционируется путем определения центров бандажей с одновременным замером их диаметров и подбандажного зазора путем точного измерения перемещений и биений бандажа и корпуса печи.

Данный метод основывается на классических оптических замерах вертикально-касательных линий бандажей в одной координатной системе. Полученные этим методом результаты не подвержены влиянию температуры (в отличие от дистанционных замеров при помощи электромагнитного лазерного прибора) позволяют точно определять отклонения геометрии бандажей от идеальной окружности. Измерения производятся во время обычной работы печи, независимо, в четырех положениях бандажей (при вращении, через каждые 90°) с обеих сторон (две касательные линии). При этом каждое измерение производится 2 раза. Такой подход позволяет определить отклонения оси печи с погрешностью ±1 мм. Кроме того, измерения и расчеты позволяют получить точные данные о диаметрах бандажей и размерах подбандажных зазоров при циклическом горизонтальном перемещении опор. Также проводится анализ точности результатов выверки с учетом формы бандажей (ее отклонения от цилиндрической). На рис. 2 и 3 приведены результаты выверки в горизонтальной и вертикальной плоскости, полученные на одном из предприятий, Результаты измерений рабочих углов и подбандажных зазоров (см. рис. 3) позволяют оценить осевую нагрузку печи.

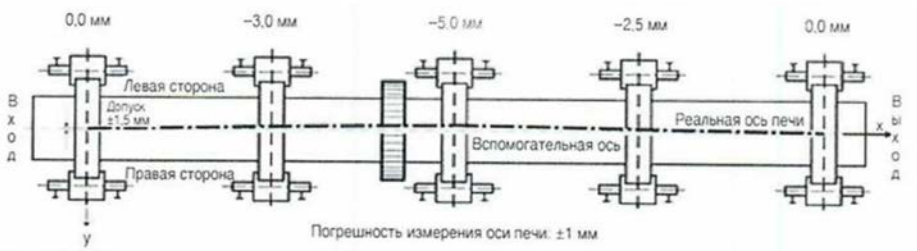


Рис. 2. Выверка х и пени в горизонтальной плоскости (здесь и на рис. 2 числа непосредственно над схемой - отклонения оси печи)

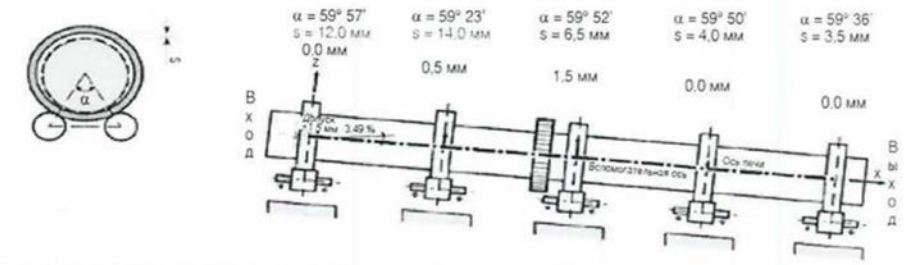


Рис. 3. Выверка оси пени в вертикальной плоскости а - рабочий угол, s - подбандажный зазор

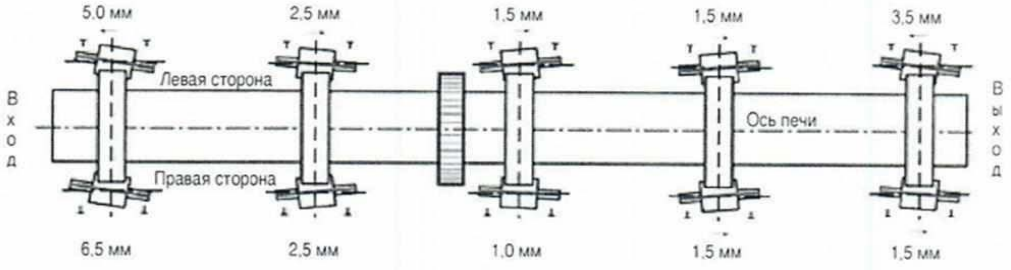


Рис. 4. Схема перекоса роликоопор в горизонтальной плоскости

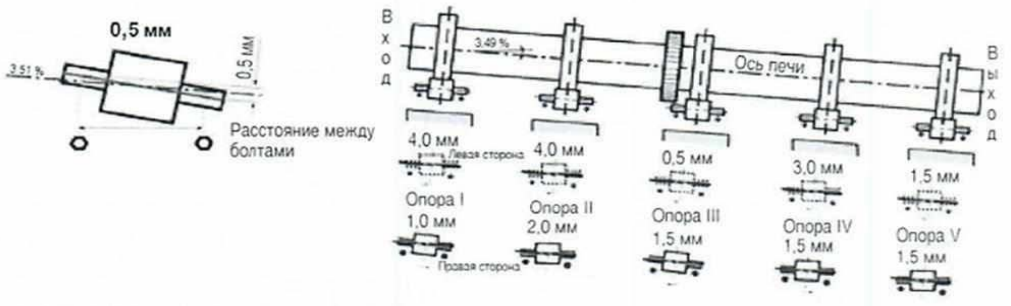


Рис. 5. Перекос роликоопор в вертикальной плоскости

Позиционирование роликоопор определяется по отклонениям как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях и является важным фактором, характеризующим несоосность роликоопор по отношению к оси вращения печи. Таким образом, можно определить горизонтальный перекос и вертикальный наклон оси роликоопор. Все измерения производятся в одной базовой системе координат, относительно оси печи, а результаты относятся к реальному (не моделируемому) положению оси.

Перекос роликоопор и по горизонтали, и по вертикали приводит к возникновению осевого усилия, оказываемого роликами на бандажи печи. Кроме того, это усилие зависит от состояния рабочей поверхности бандажа и формы рабочей поверхности опорных роликов и учитывается при выполнении комплексных инструментальных замеров. Одновременно определяется позиция оси роликоопор и степень контакта поверхности роликоопор и бандажей.

Эти мероприятия необходимы для разработки оптимальной программы регулировки опорных роликов. Результаты выверки отклонений опорных роликов представлены на рис. 4 и 5.

Механическая наладка по нашей методологии является обязательным этапом, следующим после выверки печи. План механической наладки составляется при обработке и оценке информации, полученной в ходе выверки. Комплекс операций, предусмотренный планом наладки, позволяет равномерно распределить нагрузку по всем опорам, что приводит к снижению износа бандажей и опорных роликов, подшипников, а также снижает риск внезапных незапланированных остановок печи.

На рис. 6 приведена схема восстановления соосности печи и роликов.

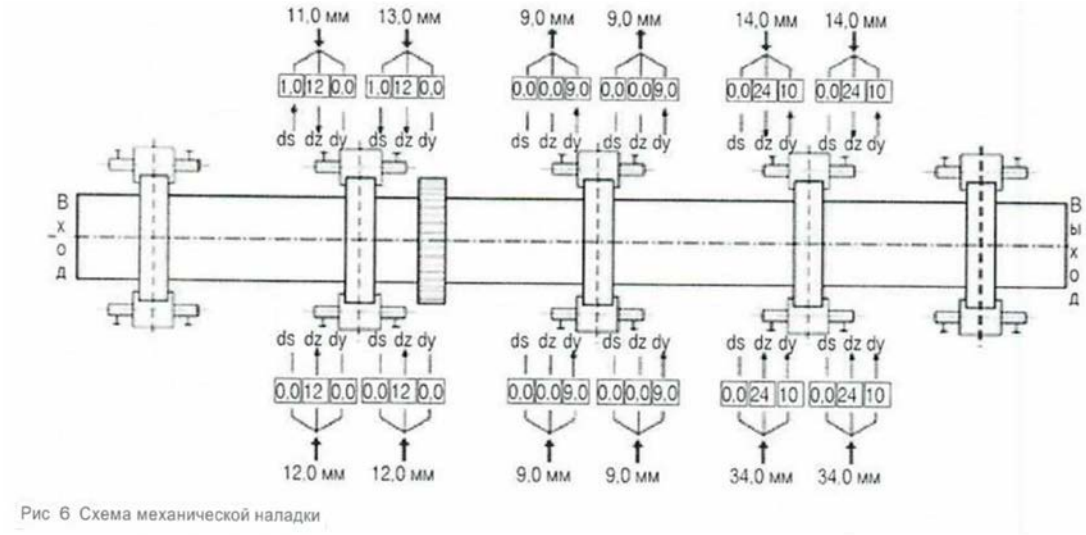


Рис 6 Схема механической наладки

Одним из этапов метода «горячей выверки» является диагностика, которая позволяет наиболее полно оценить техническое состояние вращающейся печи и выявить имеющиеся дефекты.

Процедура диагностики включает в себя около 20 действий. Наиболее значимыми из них являются:

определение геометрического состояния корпуса печи и выявление дефектов;

определение действительного положения опорных фундаментных рам по отношению к проектному;

определение положения системы главного привода во взаимосвязи с осью печи;

определение состояния контактных поверхностей между бандажами и роликами;

измерение рабочих температур корпуса, бандажей и роликов в момент проведения инструментальной выверки;

проверка состояния гидроупоров и их местоположения;

определение формы корпуса печи с учетом пластических деформаций, возникших при эксплуатации;

оценка состояния открытого зубчатого зацепления и расположения венцовой и подвенцовой шестерни по отношению к оси вращения печи;

формирование диагностической карты обнаруженных дефектов.

Первым этапом диагностических работ является изучение профиля корпуса печи. Обычно он определяется примерно для 30 сечений печи, но можно выполнить измерения для любого числа сечений. Также для некоторых сегментов корпуса интервал между сечениями может быть не таким, как для других (например, можно предусмотреть сечения через каждый метр, для каждого шва и т. д.).

Измерения проводятся при помощи лазерного прибора. В каждом сечении определяются координаты примерно 500 точек по окружности корпуса. По сути, создается радиальная диаграмма деформаций, отражающая значение и направление эксцентричности корпуса печи по отношению к оси вращения. Основная задача состоит в том, чтобы учесть влияние выявленной цикличности деформации корпуса на расчетное значение эксцентричности оси печи. Для достижения этого используется программное обеспечение, разработанное на базе статистических методов. На основе определенных параметров строится радиальная диаграмма и составляется 3D- модель (рис.7). Она позволяет определить состояние корпуса печи, наличие на нем «горбов», а также отклонение его геометрического центра от оси вращения печи.

Измерения геометрии корпуса печи с использованием линейного лазерного сканирования позволяют точно визуализировать деформацию корпуса. Более ранние методические разработки не давали возможности смоделировать взаимосвязь цикличной деформации, радиального биения корпуса, бандажей и радиального биения привода. В итоге разработан способ, позволяющий отражать все эти параметры одновременно на единой трехмерной модели визуализации деформации, которая соответствует мировому уровню среди аналогичных решений.

В результате проведения большого числа экспериментов появилась возможность проанализировать состояние геометрии корпуса и его связь с бандажами и приводом на экране их собственного монитора. Разработанная компанией модель вращается так же, как реальная печь, ее можно легко повернуть, рассмотреть со всех сторон. Но самым важным преимуществом данного подхода является возможность оценки состояния печи, планирования необходимых ремонтов и замены оборудования, определения участка печи для коррекции и оценки его влияния на бандажи и привод.



Рис. 7. 3Э-модель профиля корпуса

Состояние контактных поверхностей бандажей и роликов проверяется после проверки корпуса печи. На этом этапе определяется состояние роликов, бандажей, подбандажных обечаек, прокладок и фиксирующих колец, упоров, упорных роликов, уплотнений, а также состояние корпуса печи для выявления каких-либо видимых дефектов в виде деформаций и трещин.

Используемые методы контроля позволяют определить дефекты на контактных поверхностях опорных роликов и бандажей для последующего устранения. Многообразие дефектов на поверхностях этих деталей пред ставлено на рис. 8.

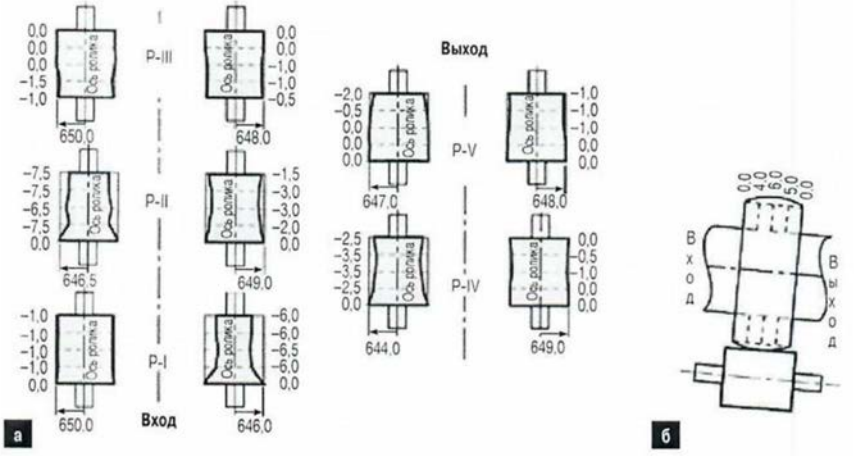


Рис. 8. Дефекты рабочих поверхностей роликов (а) и профиля бандажей (б). Числа под изображениями роликов и сбоку от них - соответственно максимальный радиус ролика и отклонение радиуса от максимального, мм. Ось каждого ролика показана в виде вертикальной линии. Измерения выполнены с погрешностью ± 0,5 мм.

В ходе диагностики также обращается внимание на состояние рам, фундаментов, системы регулирования и общее состояние печи. На основании осмотра создается пакет документации с описанием проблем и нарушений, выдаются заключения и рекомендации.

Диагностика радиальных и торцевых биений бандажей, роликов и венцовой шестерни позволяет определить соответствие этих биений допустимым значениям. На рис. 9 приведены результаты замера радиального биения роликов.

Биение бандажей может быть вызвано деформацией корпуса печи, износом регулировочных прокладок или внутренней поверхности бандажей, а чаще всего сочетанием всех этих факторов. Превышение предельно допустимого значения осевого биения влечет за собой негативные последствия для опорных роликов. В крайних случаях биение может привести к появлению зазора между бандажом и роликами. При движении бандажа положение зазора меняется, следствием чего становится неравномерная нагрузка на подшипники. Результаты замера биения бандажа приведены на рис. 10.

Отметим, что при сокращении линии контакта бандажа с роликом давление на подшипники резко увеличивается. Биение бандажей может быть устранено в ходе планового ремонта. Во время инспекции печи осуществляется точное измерение ее деформации и изучается взаимосвязь между биением бандажей и биением венцовой шестерни (рис. 11). Все эти факторы визуализируются с помощью трехмерной модели.

Радиальное биение венцовой шестерни оценивается во время стандартной инспекции печи путем мониторинга изменений зазоров. Для получения точных результатов измерений ведется непрерывная запись данных, поступающих с цифровых датчиков. Оценка характеристик радиального биения привода позволяет диагностировать причины циклически повторяющегося высокого уровня вибрации. Кроме того, результаты измерений дают четкие и достоверные данные, необходимые для центровки привода. Полученные данные отображаются на трехмерной модели.

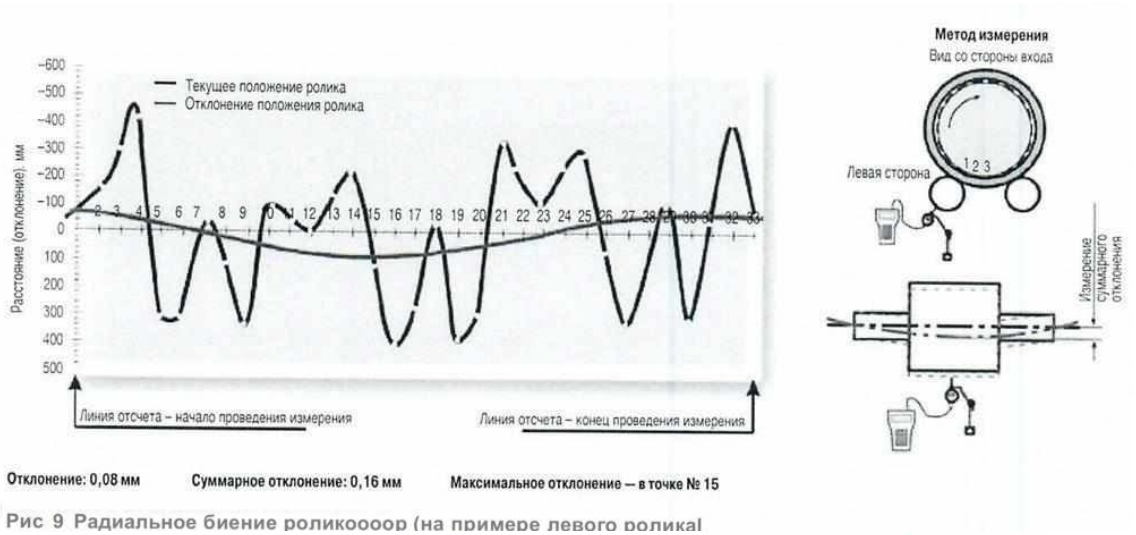


Рис 9 Радиальное биение роликоооор (на примере левого ролика)

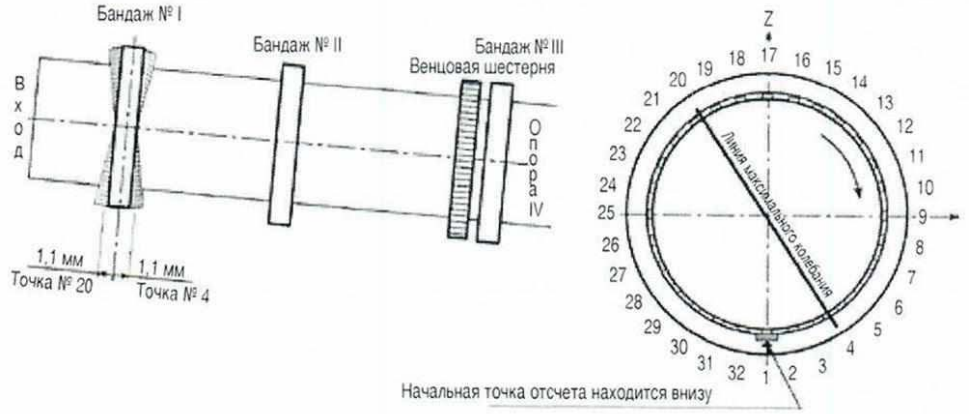


Рис. 10 Биение бандажа

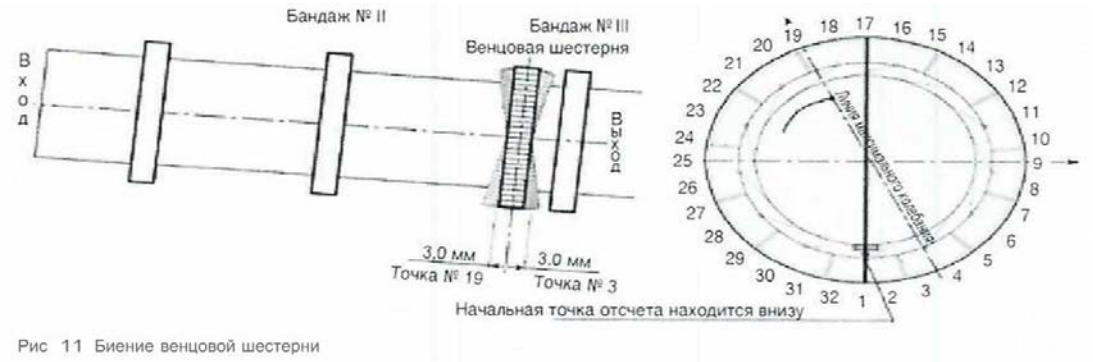


Рис 11 Биение венцовой шестерни

Процедурой диагностики печи предусмотрено также определение реального **уклона опорных рам**, так как правильная установка фундаментной рамы является одним из главных условий нормального распределения нагрузки по опорам. Выверка фундаментных рам позволяет определить уклон и общее состояние рам (рис. 12).

Разработанный диагностический комплекс «горячей выверки» кроме перечисленных выше основных работ предусматривает следующее:

проверку состояния роликов, бандажей, торцевых упоров, корпуса печи;
контроль состояния привода и венцовой шестерни, а также системы ее крепления;
проверку состояния рам и фундаментов;
проверку состояния гидроупоров;
проверку корпуса печи на наличие пластических деформаций (Shelltest);
проверку зацепления венцовой и подвенцовой шестерни с определением зазоров;
механический анализ печи.

Используемые методы и средства обеспечивают высокую точность и достоверность результатов диагностики. После окончания диагностических процедур появляется возможность с использованием инновационных методов ремонта и прогрессивных технологий, устранить все виды неисправностей и обеспечить длительную безаварийную эксплуатацию вращающихся печей.

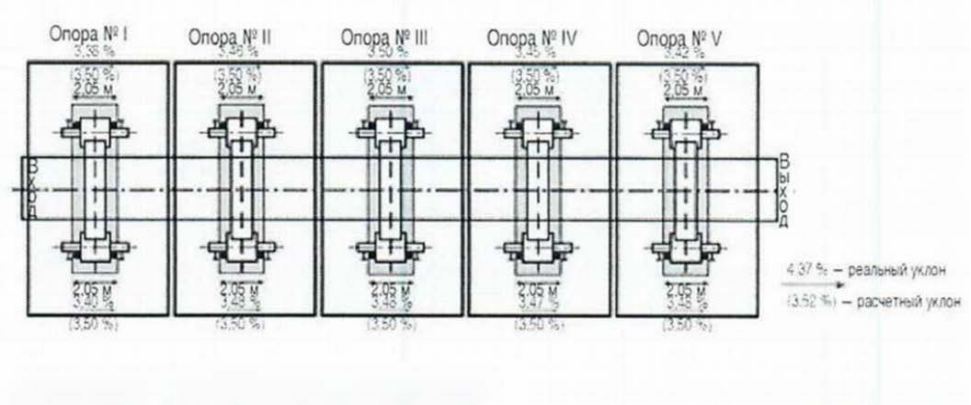


Рис. 12. Результаты определения угла наклона опорных рам

Предлагаемый метод «горячей» выверки обладает высокой экономической эффективностью, так как в отличие от «холодной» выверки не требует останова печи и не прерывает выпуск продукции. По расчетам специалистов, реальные потери от простоя одной печи в течение суток составляют от 200 тыс. до 500 тыс. руб.

Следовательно, экономический эффект от использования метода «горячей» выверки может исчисляться миллионами рублей.

Список литературы

1. Асташенков Г.Г. Определение оптимального положения оси корпуса вращающейся печи // Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1992, №2. С. 16-24.
2. Биргер П.И. Техническая диагностика М. Машиностроение, 1978, 240 с.
3. Гончаров А.Б., Гончаров А.А., Тулинов А.Б. Способ Горячей выверки оси вращающейся печи. Патент №2665024.
4. Гончаров А.Б., Топоров М.Ю. Техническое обслуживание. Модернизация и восстановление опорных узлов вращающихся печей // Цемент и его применение. 2008, №1. С. 1-3.
5. Дроздов Н.Е. Эксплуатация, ремонт и испытание оборудования предприятий строительных материалов, изделий и конструкций: Учебник для вузов. М., Высшая школа, 1979. 312 с.
6. Жуков Б.Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации. Новосибирск: СГГА, 2004. 370 с.
7. Ходоров Е.И. Печи цементной промышленности. Ленинград, Стройздат, 1986, 456 с.
8. Z. Krystowczyk. «Geometry Measurement Of Kilin Shell in Dynamic Condition» // Cemend Building Materials, № 7 v Z s 16, June 2004. P. 34 -37.

Гончаров Андрей Александрович, инженер II категории, a.goncharov.mit@mail.ru, Россия, Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

Утенков Владимир Михайлович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, utencov@mstu.ru, Россия, Москва, Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана,

Иванов Вячеслав Александрович, канд. техн. наук, доцент, master777k@mail.ru, Россия, Черкизово, Российский Государственный Университет туризма и сервиса

EFFECTIVE METHODS OF CONTROL AND RECOVERY THE GEOMETRIC AXIS OF THE ROTATING FURNACE AFTER MECHANICAL PROCESSING OF SUPPORT UNITS

A.A. Goncharov, V.M. Utenkov, V.A. Ivanov

The article presents a new method for improving the operational reliability of rotating cement kilns. The basis of the method is a set of diagnostic and control procedures that are carried out without stopping and unloading the kiln, i.e. in a hot state. Based on the results of the reconciliation, the kiln is mechanically adjusted to eliminate the deviations of the geometric axis of the kiln and defects of the main components identified during the diagnosis. The methods described in the article for determining the position of the kiln in the horizontal and vertical planes, radial and end runout of the main support units, checking the condition of drives, hydraulic seals, kiln shell and building a computer model of the kiln unit allow for high-quality mechanical adjustment and ensure an increase in equipment productivity.

Key words: diagnostics, rotating kiln, tites, rollers, hydraulic seals, hot alignment, shell, gift gear, alignment, mechanical adjustment.

Goncharov Andrey Alexandrovich, engineer of the II category, a.goncharov.mit@mail.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University,

Utenkov Vladimir Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, utencov@mstu.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State University,

Ivanov Vyacheslav Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, master777k@mail.ru, Cherkizovo, Russia, Russian State University of Tourism and Service

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-512-513

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СППР ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ РАЦИОНОВ ПИТАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ГРУПП

Е.С. Половинкин, М.С. Чванова

В статье рассматриваются ключевые проблемы и особенности, связанные с созданием системы поддержки принятия решений (СППР), направленной на автоматизацию процессов формирования рационов питания для специализированных групп. Новизна работы состоит в том, что впервые поставлен вопрос о ключевых проблемах, возникающих при создании СППР для подбора рационов питания указанных групп. Основное внимание уделяется проблемам, связанным с проблемами обработки больших массивов данных о питании, использовании методов искусственного интеллекта, а также необходимости учета индивидуальных потребностей. Анализируются сложности стандартизации данных и адаптации системы к динамическим изменениям параметров здоровья пользователей. Рассматриваются проблемы, связанные с обработкой и стандартизацией данных, персонализацией рекомендаций, интеграцией искусственного интеллекта и биоинформатики, а также учётом генетических, физиологических и экологических факторов. В статье подчеркивается важность разработки СППР для оценки рациона питания и значимость постоянного обновления системы в ответ на изменения состояния здоровья пользователей.

Ключевые слова: автоматизация процессов формирования рационов питания, персонализированное питание, искусственный интеллект, система поддержки принятия решений

Введение. Рациональное питание играет ключевую роль в поддержании здоровья и жизнедеятельности человека. Особенно важно уделять внимание питанию специализированных групп, таких как спортсмены, пациенты с хроническими заболеваниями и пожилые люди. Эти группы имеют специфические потребности в питательных веществах, которые обусловлены их физиологическим состоянием, уровнем физической активности и особенностями обмена веществ. В связи с этим, разработка индивидуализированных рационов питания для таких групп становится актуальной задачей.

В настоящее время существует множество научных исследований, посвященных вопросам питания специализированных групп. Однако часто встречается проблема фрагментарности данных и отсутствия интегрированной системы, которая могла бы помочь в принятии решений относительно подбора оптимального питания для различных категорий людей. Создание системы поддержки принятия решений (СППР) может существенно повысить эффективность и точность рекомендаций по питанию, что, в свою очередь, положительно скажется на здоровье и качестве жизни этих групп. Это актуально для таких специализированных групп как спортсмены, для них важно обеспечивать организм достаточным количеством энергии и питательных веществ для поддержания высокой физической активности и ускоренного восстановления после тренировок и соревнований, пациенты с хроническими заболеваниями. Например, больные сахарным диабетом или сердечно-сосудистыми заболеваниями требуют специального подхода к питанию, чтобы поддерживать стабильное состояние и предотвращать возможные осложнения, представители различных профессий - у них, в связи с возможной специфической физической, психологической нагрузками может изменяться метаболизм и, следовательно, потребности в питательных веществах, что требует корректировки рациона для поддержания здоровья и предотвращения различных, в том числе, профессиональных заболеваний.

Прежде, чем рассматривать проблемы при разработке СППР для автоматизации формирования рационов питания специализированных групп важно определится с понятиями, используемыми в данном исследовании. Это важно по причине того, что в настоящее время они являются неустойчивыми, несмотря на существующие дефиниции этих понятий.

Описание проблемы. В текущее время не существует четкого понятия о том, что же такое персонализированное питание. В научных исследованиях различных авторов присутствуют лишь параметры, которыми оно должно обладать и цели его создания. Так, согласно исследованию, проведенному Хосе Орвадос и ряда других ученых, персонализированное питание базируется на использовании информации об индивидуальных характеристиках человека для разработки и конкретных рекомендаций, продуктов или услуг в области питания для того, чтобы помочь людям добиться долговременных изменений в поведении, благотворно влияющих на их здоровье[1].

Согласно теории адекватного питания, существуют и развиваются различные концепции дифференцированного, направленного, функционального и индивидуального питания[2].

Согласно исследованиям академика В.А. Тутельяна питание будет базироваться на совокупности традиционных продуктов с продуктами заданного химического состава и генетически модифицированными с широким применением для коррекции показателей здоровья человека[3]. Целью, на которую направлено персонализированное питание как очень важной части концепции точного питания [4] определяется создание рекомендаций по питанию для возможного лечения и профилактики метаболических нарушений, основанных на изменении взаимосвязанных параметров во внутренней и внешней среде человека на протяжении всей жизни[5].

Таким образом, сформировалась гипотеза о том, что ключевыми факторами, определяющими подходы к персонализированному питанию, являются: диетические привычки, пищевое поведение, физическая активность, детализированное фенотипирование с формированием соответствующих стратегий, понимание процессов метаболизма, кишечная микробиота, высокотехнологичные инструменты сбора информации о питании и формирования персонализированных рекомендаций, генетические факторы, описываемые в таком направлении современных исследований, как нутригенетика[6].

Эти факторы могут объяснить индивидуальную изменчивость метаболического ответа на конкретные диеты[7]. Учитывая все вышеперечисленное, можно попытаться сформулировать уточненное понятие персонализированного питания.

Таким образом, уточним понятие. Персонализированное питание – это подход к питанию, основанный на использовании информации об индивидуальных характеристиках человека, таких как: диетические привычки, пищевое поведение, физическая активность, процессы метаболизма, кишечная микробиота, результаты сбора информации высокотехнологичными инструментами, генетические факторы и другие, для разработки конкретных рекомендаций, продуктов или услуг в области питания, который направлен на достижении долгосрочных изменений в состоянии и поведения человека, положительно влияющих на показатели его здоровья.

В отдельных случаях целью персонализированного питания может являться создание рекомендаций по питанию для лечения и профилактики метаболических нарушений, основанных на изменении взаимосвязанных параметров во внутренней и внешней среде человека на протяжении всей жизни.

Причиной возникновения таких нарушений могут быть различные заболевания. Исследованиями специалистов ВОЗ показана взаимосвязь пищевых рационов с возникновением ряда заболеваний, в частности, сердечно-сосудистой системы, пищеварительной, эндокринной и других систем. Нарушения в структуре питания стали одним из ведущих факторов развития и хронизации большинства неинфекционных заболеваний.

Длительное нарушение биологических законов питания приводит к различным изменениям метаболизма в клетках, что приводит к алиментарным заболеваниям[8]. Так, сахарный диабет является одним из таких расстройств. Это заболевание эндокринной системы, возникающее при недостаточности инсулина в организме человека, что приводит к нарушению углеводного обмена, а впоследствии и всех остальных видов обмена. При сахарном диабете отмечается нарушение со стороны сердечно-сосудистой, нервной, мочевыделительной систем, которые развиваются вследствие гипергликемии (повышение уровня глюкозы в крови). Сахарным диабетом страдает 6 % населения, в цивилизованных странах число заболевших удваивается каждые 15 лет. Сахарный диабет занимает третье место среди причин смерти после сердечнососудистых заболеваний и онкологии[9]. При сахарном диабете формирование правильного рациона питания имеет огромное значение для контроля состояния больного и предупреждения тяжелых осложнений. Питание является обязательным элементом терапии диабета. Неправильное питание может негативно сказаться на многих органах и системах организма, таких как желудок, печень, кишечник, поджелудочная железа, скелет, сердце и желчевыводящие пути. Поэтому важно учитывать калорийность рациона, баланс белков, жиров и углеводов, а также ограничивать потребление продуктов с высоким гликемическим индексом. При составлении плана питания необходимо включать в рацион все типы пищи в рациональном количестве, отдавая предпочтение нерафинированным продуктам, богатым клетчаткой. Также важно следить за размером порций и частотой приемов пищи, избегать длительных перерывов между ними и пить достаточное количество чистой воды. Соблюдение данных правил питания помогает больному контролировать уровень сахара в крови, то есть приводить показатели здоровья человека в рамки допустимых.

Таким образом, становится очевидным, что выстраивание персонифицированного питания – это задача, предусматривающая рассмотрение сверхсложной процессуальной системы и управление этим процессом зависит от множества разных параметров, причем выделить наиболее важный из них не представляется возможным – для нормализации состояния здоровья человека все они важны. Исходя из этого, становится очевидным, что традиционным подходом выделения основных параметров задачу не решить или ее решение окажется не применимым на практике. Нужны новые подходы, которые могут реально помочь человеку с выбором рационального питания при существующих у него ограничениях.

Описание проблем разработки СППР. Прежде чем выбрать подход к решению задачи, необходимо понять сложности, связанные с разработкой и выбором СППР для автоматизации составления рационов питания для людей с особыми потребностями (специализированных групп). Хотя общие полезные свойства пищи исследованы, механизмы их воздействия на профилактику заболеваний и улучшение здоровья еще не изучены в полной мере. Кроме того, реакция на диетические изменения может значительно различаться у разных людей, и для одних когорт возможно извлечение большей пользы, чем для других. Это различие степени воздействия можно объяснить физиологическими характеристиками, такими как: возраст, генетические особенности, пол, воздействием окружающей среды, образ жизни, метаболизм, состояние микрофлоры кишечника, и спецификой и качеством рациона питания. Показатели биомаркеров также являются результатом различных реакций на питание.

Методы редукционизма не применимы для объяснения того, как молекулярные и клеточные реакции на пищу благоприятствуют повышению показателей здоровья человека. Для более эффективного анализа персонифицированных реакций на рацион применяются системная биология, метаболомика, протеомика, геномика. Вышеназванные направления современной науки способны производить интеграцию и анализ значительных объемов данных, собранных в результате различных опытов по изучению вопросов формирования рационов питания. Уже сего-

дня использование системных биологических подходов оказывает большое влияние в таких областях, как, например, иммунология, но наравне с этим, присутствуют и сложности, когда речь заходит о попытках использования полученных результатов в исследованиях, направленных на человека. Чтобы детально разобраться в вопросе, как связаны между собой здоровье и качество питания нужно понимать, что в данном случае невозможно обойтись без учета результатов динамического сетевой анализа процессов, происходящих в организме человека, как в здоровом состоянии и состоянии какого-либо заболевания, так и в момент начала течения болезни. Все вышесказанное приводит к пониманию, что необходимо сосредоточиться на применение новых прогностических методов для более детализированного объяснения индивидуальных реакции на вмешательство в рацион питания, их особенностей, изменений показателей здоровья.

Перспективы системной науки могут помочь врачам адаптировать методы целевого лечения, понять различия в ответах на терапию и разработать персонализированные подходы к питанию. Персонализированные стратегии в этой области могут способствовать созданию новых процессов обработки данных, связанных с пищеварением, усвоением и метаболизмом, интегрируя молекулярные события и клинические результаты через следующие подходы: генерацию неожиданных и неочевидных гипотез, интеграцию данных на различных уровнях анализа, экспериментальную проверку с использованием доклинических и клинических исследований с применением стандартизированных диетических вмешательств, использование моделей многомерного анализа для выявления связей между параметрами здоровья и современными методами машинного обучения [10].

Эти подходы позволяют формировать более целостное представление о процессах, происходящих в организме, что способствует выявлению скрытых закономерностей и пониманию влияния питания на различные аспекты здоровья. Внедрение персонализированных подходов к питанию также может поддержать профилактику и лечение ряда хронических заболеваний, таких как метаболический синдром, сердечно-сосудистые заболевания и диабет.

Использование системного подхода также открывает возможности для междисциплинарных исследований, объединяющих специалистов из биоинформатики, медицины, диетологии и анализа данных. Синтез их знаний позволяет создать основу для более точной и обоснованной разработки планов питания, что в долгосрочной перспективе может значительно повысить эффективность стратегий, направленных на улучшение здоровья населения. Благодаря им врачи и специалисты по питанию смогут предлагать пациентам более точные и адаптированные к их потребностям рекомендации, учитывающие не только текущие биохимические и физиологические показатели, но и прогнозируемые изменения на основе прогностических моделей.

Использование таких платформ также будет способствовать углубленному исследованию причинно-следственных связей между диетическими факторами и состоянием здоровья, позволяя выявлять потенциальные риски и предотвращать их еще на стадии планирования диеты. В перспективе, эти системы помогут перейти от универсальных рекомендаций к более детализированным и индивидуализированным подходам, способным учитывать даже малейшие отличия в физиологии и образе жизни человека.

Кроме того, данные, собранные с помощью таких платформ, могут способствовать улучшению моделей прогнозирования и алгоритмов искусственного интеллекта, которые помогут врачам выявлять и анализировать редкие случаи и аномалии. Это может сыграть ключевую роль в оптимизации здравоохранения и снижении затрат на лечение, так как позволит переходить к проактивному, а не реактивному подходу к здоровью пациентов. Идея персонализированного питания стимулирует большой интерес к разработке диагностических систем и СППР, которые обеспечивают непрерывный мониторинг и оценку состояния питания.

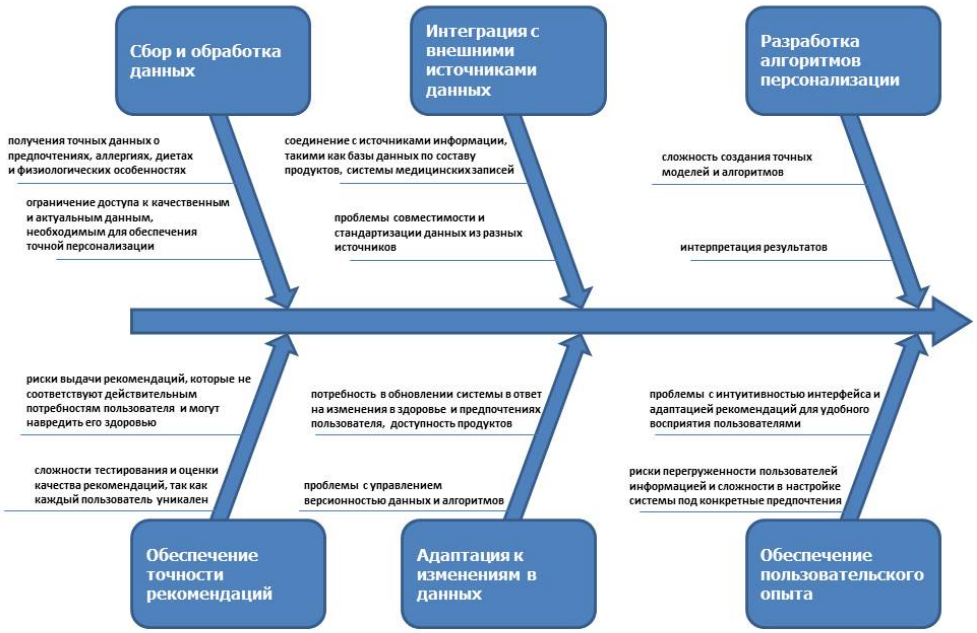


Рис. 1. Проблемы, встречавшихся при разработке систем персонализированного питания

Такие диагностические системы и СППР (системы поддержки принятия решений) помогут специалистам отслеживать динамику состояния здоровья пациента и оперативно корректировать диетические рекомендации на основе полученных данных. Использование сенсорных устройств и портативных мониторов в сочетании с анализом больших данных позволяет контролировать ключевые параметры, такие как уровень глюкозы, липидный профиль, маркеры воспаления и микробиом кишечника. Это способствует более глубокому пониманию того, как конкретные продукты или нутриенты влияют на здоровье, что особенно важно для пациентов с хроническими заболеваниями или особыми потребностями.

Внедрение таких технологий также открывает возможности для создания цифровых двойников пациентов — виртуальных моделей, которые позволяют симулировать воздействие различных диет и прогнозировать их влияние на организм. Это дает врачам и нутрициологам уникальную возможность протестировать диетические вмешательства и оценить потенциальные риски и эффекты, не подвергая пациента прямому воздействию.

Кроме того, интеграция данных из различных источников — геномных, клинических, биохимических и поведенческих — способствует непрерывному обучению моделей ИИ и улучшению прогнозов. Такой комплексный подход позволит создавать персонализированные рационы, направленные не только на коррекцию существующих проблем, но и на профилактику возможных осложнений, поддерживая здоровье человека в долгосрочной перспективе.

Тем не менее, как показано на рис. 1., во время проектирования цифровой системы персонализации пищевых продуктов мы можем столкнуться с рядом проблем.

Задачи и их детализация при разработке СППР. Исследование биологических механизмов на уровне отдельного гена или белка в области питания сегодня считается многими учеными устаревшим. Взаимодействие между питанием, метаболизмом и микрофлорой на клеточном и молекулярном уровнях, а также их влияние на здоровье на индивидуальном уровне пока недостаточно изучено. Для целостного понимания здоровья важно учитывать взаимосвязь между питанием, генами, их продуктами, состоянием здоровья и факторами окружающей среды, вместо того чтобы фокусироваться только на взаимодействиях питательных веществ с отдельными генами или их продуктами. Современные экспериментальные методы ограничены в возможности контролируемого управления рационом питания у людей и животных и не всегда позволяют отслеживать процессы на уровне тканей, клетки и молекулярных взаимодействий, включая сигнальные механизмы. В этом могут помочь подходы, основанные на данных, использующие многопараметрические измерения, такие как воздействие питательных веществ на экспрессию генов.

Текущая система здравоохранения оценивает статические показатели здоровья, включая данные из ЭМК и результаты физического осмотра. Однако помимо этих статических данных, непрерывные измерения факторов здоровья, таких как ежедневное потребление пищи, состав микробиома, уровень метаболитов, качество сна и уровень стресса, могут позволить делить пациентов на подгруппы для более точного анализа. Определение базового диапазона для каждого показателя здоровья является ключевым. Эти многопараметрические измерения не только фиксируют динамическое взаимодействие между различными показателями здоровья, но и помогают в раннем выявлении заболеваний и поддерживают процесс принятия решений. Современные достижения в компьютерном моделировании, инструментах анализа данных и системных подходах могут быть использованы для разработки и обновления стратегий здравоохранения, основанных на питании, и улучшения профилактики заболеваний.

Интеграция данных из электронных медицинских карт (ЭМК), носимых устройств и приложений для здоровья с индивидуальными характеристиками представляет собой подход «больших данных». ЭМК служат клиническими хранилищами, в которых в реальном времени обновляется информация о здоровье пациента, собираемая в различных медицинских условиях. Эти данные включают физиологические показатели, демографические сведения, клинические заметки, анамнез, лабораторные результаты, назначения лекарств, радиологические отчеты и административную информацию. Эти данные отличаются от информации в реестрах заболеваний, страховых заявлениях и базах данных рецептов, поскольку предназначены для непосредственного ухода за пациентами, выставления счетов и являются важными для медицинских исследований. Хранилища данных ЭМК достаточно обширны и могут быть объединены с другими базами для выявления связей между фенотипическими данными и генетическими факторами риска. На мировом уровне уровень использования ЭМК растет, и ожидается, что вскоре в таких системах будет регистрироваться до миллиарда посещений пациентов ежегодно. Однако важно отметить, что данные о питании в ЭМК пока ограничены. Сбор информации о повседневном рационе, питательной ценности продуктов и интеграция данных о потребительских товарах с клиническими записями в ЭМК может открыть новые пути для развития точной медицины и персонализированных рекомендаций по питанию. Носимые устройства, синхронизированные с мобильными технологиями, становятся все более популярными, фиксируя параметры в режиме реального времени, такие как физическая активность, сожженные калории и уровень глюкозы в крови, что может помочь в индивидуальной оценке состояния здоровья. С учетом растущей потребности в сборе данных в реальном времени сотрудничество между медицинскими организациями, страховщиками и больницами становится крайне актуальным.

Использование передовых методов искусственного интеллекта также играет ключевую роль. В здравоохранении генерируется огромный объем данных, который может быть использован для исследований, связанных с оценкой рисков, лечением заболеваний и стратификацией пациентов. Для создания прогнозных моделей на основе данных пациентов необходимо применять методы моделирования данных, поскольку современные вычислительные системы и аналитические платформы помогают организовать, интерпретировать и извлекать из данных паттерны, касающиеся здоровья. Эти модели предполагают использование систем искусственного интеллекта и математических методов, включая дифференциальные уравнения, правила и другие подходы для моделирования и анализа данных.

С расширением использования методов искусственного интеллекта (ИИ) крупные хранилища данных становятся не просто хранилищами, а полноценными системами для анализа и извлечения знаний. Современные

технологии машинного обучения (МО) и ИИ становятся ключевыми инструментами для создания синтетических популяций пациентов, построенных на основе масштабных клинических данных. Эти технологии открывают новые возможности для исследования связей между режимами питания и изменениями молекулярных сигнатур в масштабе всего генома, что позволяет прогнозировать состояние здоровья, а также выявлять ранние признаки ухудшения здоровья и патологий.

При внедрении платформ аналитики данных как систем поддержки принятия решений важно учитывать не только их научные и функциональные возможности, но и аспекты управления и технологической совместимости. Ключевым фактором является интеграция ЭМК с технологиями МО и ИИ, а также необходимость разработки новых биомаркеров. С появлением моделей глубокого обучения, а также достижений в компьютерном зрении, стало возможным автоматизировать анализ клинических изображений. Например, глубокие нейронные сети, обученные на тысячах клинических изображений, показывают высокую точность в диагностике заболеваний, таких как рак кожи и диабетическая ретинопатия, иногда превосходя специалистов. Это подчеркивает потенциал ИИ как интеллектуальной поддержки принятия клинических решений. Аналогично ИИ может отслеживать содержание питательных веществ в ежедневном рационе и связывать эти данные с показателями здоровья. Это особенно важно для пациентов с хроническими метаболическими расстройствами, такими как диабет или ожирение, и тех, кто стремится поддерживать здоровый индекс массы тела.

Использование мобильных приложений и носимых датчиков также упрощает процесс ввода данных о питании, фиксируя изображения пищи, которые служат для обучения моделей МО наряду с данными из ЭМК. Модели МО могут дополнительно обрабатывать эти данные, оценивая калорийность, что помогает в мониторинге потребления пищи и отслеживании здоровья. Тем не менее, такие технологии требуют доработки для точного анализа сложных блюд с разнообразными ингредиентами и специями. В системе здравоохранения ИИ также интегрируется с участием врачей, которые проверяют прогнозы и рекомендации для помощи в принятии решений. После анализа рекомендаций ИИ врачи могут скорректировать или предложить дополнительные рекомендации по питанию или лечению, а ИИ-системы могут отправить рецепты в аптеку пациента и уведомить его о рекомендациях в режиме реального времени.

Кроме того, прогнозные модели, объединяющие данные пациента с молекулярных, клинических и других источников, могут выявлять новые биомаркеры для точной оценки индивидуальных реакций и различий в ответах на определенные диеты. Эти биомаркеры, такие как уровни незаменимых жирных кислот, белка, натрия и калия в плазме, могут варьироваться в зависимости от возраста и других факторов. Однако необходимы новые биомаркеры, которые бы отражали общие особенности рациона. Их интеграция с моделями МО позволит более точно прогнозировать персонализированную диету для каждого человека, учитывая его уникальные физиологические особенности и динамику здоровья.

Несмотря на значительный прогресс в науке о питании и данных, вызванный технологической революцией, необходимость создания персонализированной вычислительной инфраструктуры для исследований в области питания остаётся актуальной. При разработке такой инфраструктуры важно учитывать вопросы, связанные с базами данных о потреблении пищи, которые позволяют систематически фиксировать сложные модели питания, переводя химический состав продуктов в энергетическую и питательную ценность. Существующие инструменты, такие как дневники питания, сложны для преобразования информации о пище в энергетические показатели. Переход на специализированную инфраструктуру информатики в области питания может стать полезным для стандартизации форматов данных, однако возможны различия в подходах к описанию и сбору информации о продуктах, включая способы получения данных из различных источников, таких как лаборатории, клиники и больницы.

Создание исследовательской инфраструктуры, направленной на персонализированные исследования питания и здоровья, может существенно поддержать развитие этих направлений. Разработка платформ, удобных для пользователей и интегрирующих данные из множества источников и исследований на разных уровнях (молекулярном, клеточном, тканевом, органном и популяционном), может позволить более глубокий системный анализ факторов, влияющих на здоровье человека. Такая инфраструктура должна учитывать персонализированные данные, а не усреднённые показатели, чтобы точнее отразить индивидуальные реакции на питание, которые зависят от генетических, экологических и поведенческих факторов, специфичных для каждого человека. Появление устройств для самоконтроля, фиксирующих состояние здоровья в реальном времени, также может облегчить сбор данных. Хотя данные из таких устройств могут быть подвержены субъективным искажениям, их точность можно повысить, если пользователи будут достаточно информированы.

Персонализированные исследования питания также могут использовать траекторные наблюдения, где данные собираются ежедневно или периодически в течение месяцев или лет, что позволяет выявлять уникальные для каждого человека тенденции и риски. Это может значительно улучшить понимание персонализированных факторов риска, которые не могут быть выявлены при анализе усреднённых данных по группе. Подобная инфраструктура принесет пользу исследователям, врачам и другим заинтересованным сторонам, предоставляя доступ к данным и результатам в сфере здоровья и питания. Расширение доступа к таким данным также поддержит научные исследования и междисциплинарные проекты, помогая в развитии сотрудничества между промышленностью и академическим сектором и способствуя созданию общественных и частных партнерств.

Основное требование к инфраструктуре заключается в её классификации и определении как системы для питания и здравоохранения (ИПЗ). Управление и использование ИПЗ должны ориентироваться на потребности пользователей и включать структуры биоинформатики питания, такие как базы данных по питанию. Примером является база данных фенотипов питания, которая упрощает хранение биологически значимых, предварительно обработанных данных, а также описательной информации и данных фенотипов участников исследований. Важными функциями ИПЗ являются управление данными, их обработка, возможности обмена, а также платформы для публикации результатов исследований в широком сообществе, например, через веб-порталы. ИПЗ следует разрабатывать с учётом методов оценки потребления пищи и предоставлять возможности для ввода данных о

ежедневном рационе пользователя в электронном формате. ИПЗ должны быть гибкими, чтобы можно было регулярно оценивать статистические эффекты вмешательств в области питания на ранних этапах.

Взаимосвязь между питанием и экологическими факторами подчеркивает необходимость учета широкого спектра экологических показателей, влияющих на здоровье, из разных регионов мира. Интеграция данных об экологических переменных в ИПЗ поможет лучше понять, как эти факторы влияют на взаимодействие между питанием, генетическим разнообразием и микробиотой. Кроме того, химический состав пищи может изменять общий и микробный профиль организма, что подтверждается исследованиями на людях и животных, и это делает включение таких данных в ИПЗ особенно важным.

Создание ИПЗ позволит объединить в одной системе информацию о компонентах пищи, потреблении, экологических переменных, данных о здоровье, расходах энергии и рисках заболеваний. Эти данные помогут выявить факторы, влияющие на поведение, которые могут быть использованы для разработки диетических вмешательств. Дополнение информации об экологических переменных и интеграция знаний о взаимодействиях, связанных со здоровьем, способствует формированию новых гипотез, интерпретации и проверке результатов исследований. Стандартизация данных и использование ИПЗ упростит интеграцию информации о пациентах из различных источников, включая амбулаторное лечение, наблюдения и данные после выписки. Это, в свою очередь, поможет глубже понять индивидуальные особенности здоровья и благополучия, а также предсказывать риски заболеваний с учетом факторов окружающей среды, текущего питания и состояния здоровья.

Применение электронных медицинских карт (ЭМК) и систем питания и здравоохранения (ИПЗ) может облегчить доступ к медицинской информации пациентов, необходимой для их ухода. Переход с бумажных записей на электронные форматы в ЭМК способствует более точной диагностике, экономит ресурсы и улучшает результаты лечения, что также поддерживает эффективные решения в области здравоохранения. Однако цифровизация может сопровождаться рядом вызовов, таких как несоответствие форматов стандартизации, ошибки в документации кодов диагнозов, что может привести к ошибочной отчетности и отказам страховых компаний. Кроме того, неполное участие пользователей и недостаточно проработанные технологии могут способствовать ошибкам и вызвать недочеты в ЭМК. Врачи также могут неверно указывать диагностические и биллинговые коды для обеспечения страхового покрытия услуг, которые могут быть сочтены ненужными с медицинской точки зрения. Несмотря на широкое внедрение ЭМК, процессы стандартизации данных, извлечения, загрузки и представления данных в отделах выставления счетов остаются несовершенными.

Необходимо, чтобы организации стремились стандартизировать форматы данных, обеспечивали прозрачную связь между врачами и составителями счетов и давали доступ к документации для проверки диагностических кодов в случае несоответствий позволит сократить количество медицинских ошибок и обеспечить соответствие нормативным стандартам. Кроме того, наборы данных пациентов должны быть динамичными для регулярного обновления и пересмотра при поступлении новой информации. Стандартизированные данные упрощают поиск и обработку информации, что необходимо для оптимизации сбора клинических данных и прогнозирования. Существуют инициативы, такие как электронные медицинские записи и геномика, направленные на стандартизацию фенотипической информации и отображение клинических данных в формат единичных нуклеотидных полиморфизмов.

С развитием новых технологий, основанных на данных, возрастает потребность в специалистах, обладающих навыками, которые сочетают вычислительные методы с клиническими и трансляционными подходами. Важными становятся умения анализа и интерпретации больших и сложных баз данных — включая ЭМК и внешние источники, такие как заявки, открытые репозитории и другие — становятся всё более востребованными. Несмотря на доступность платформ с открытым исходным кодом, при установке, настройке и управлении анализом данных часто возникают сложности. Необходима подготовка специалистов, обладающих интегрированными знаниями в области наук о данных, биологии, питания, биомедицины, информатики, статистики и математики.

Хотя технологии искусственного интеллекта совершают прорыв в различных областях, важно помнить, что они являются инструментом для облегчения принятия решений, а не заменой экспертного человеческого опыта. Центральным элементом любой ИИ-системы остается «пользователь», который интерпретирует большие и сложные данные. Люди и их профессиональные знания играют важнейшую роль в процессе выявления знаний. Чтобы воспользоваться расширенными прогностическими возможностями ИИ, необходимо сотрудничество с экспертами — специалистами в таких областях, как нутрициология, биоинформатика, компьютерные науки, статистика, иммунология, биохимия, физиология, эндокринология, спорт и математика. Поскольку модели ИИ обучаются на предварительно обработанных данных, участие специалистов в предметной области является неотъемлемой частью этого процесса. Развитие ИИ-технологий достигло такой степени, что их доступность для всех стала крайне важной.

При работе с клиническими данными из электронных медицинских карт (ЭМК) одной из главных проблем остаются высокая размерность и редкость данных. ЭМК фиксируют все клинические события во время визитов или пребывания пациента в больнице. Однако в ЭМК часто встречаются пробелы в данных, сами данные могут быть сложными, неоднородными и содержать как структурированную, так и неструктурированную информацию. Структурированные данные включают демографическую информацию, клинические измерения, назначения лекарств и диагнозы, в то время как неструктурированные данные могут содержать рукописные записи врачей. Пробелы в данных подразделяются на три категории: полностью случайные, случайные и неслучайные. Полностью случайные пропуски происходят, когда разница между отсутствующими и наблюдаемыми значениями несущественна (например, из-за сбоя в работе медицинского оборудования). Случайные пропуски возникают, когда между отсутствующими и наблюдаемыми значениями существует систематическое различие (например, когда на значения влияет возраст или пол). Не случайные пропуски возникают, если пациенты пропускают прием по состоянию здоровья. Также может возникнуть дублирование данных, например, когда пациент многократно получает одно и то же лекарство.

Эти проблемы не только усложняют анализ данных из ЭМК, но и вносят разреженность и дублирование в доступную информацию. Важно учитывать отсутствие данных, так как они могут исказить результаты. В случаях пропусков применяются методы регрессии и анализа главных компонент, а также методы заполнения пропущенных

значений, такие как средние значения, медианные значения и метод ближайших соседей (k-NN). Для более сложных случаев применяются стохастические методы, такие как множественное вменение с использованием цепных уравнений, что помогает минимизировать искажения и сохраняет полноту информации для анализа.

Замена пропущенных значений на средние или медианные значения из распределения данных может вызвать систематические ошибки, особенно если пропущенные данные находятся в хвостовой части распределения. В случае метода K-ближайших соседей, пропущенные значения могут быть оценены на основе значений, полученных от группы схожих индивидуумов. Эти значения могут быть усреднены и назначены отсутствующему значению. Однако метод K-ближайших соседей может быть неэффективен, если индивиды не могут быть явно разделены на группы по данным их истории болезни. Стохастический метод, использующий многократное вменение через цепные уравнения, является основой для различных алгоритмов вменения. Процесс повторяется несколько раз, и на каждом шаге обновленные данные используются для обучения модели в следующей итерации. Важно отметить, что даже случайные процессы могут быть подвержены смещению. Методы множественного вменения предполагают, что данные нормально распределены, поэтому исключение переменных с ненормальным распределением может добавить смещение в результаты. Кроме того, методы множественного вменения требуют значительных вычислительных ресурсов, а время выполнения этих алгоритмов зависит от объема отсутствующих данных. Выбор метода вменения зависит от таких факторов, как размерность данных, количество индивидуумов, взаимосвязи между переменными, а также характер и количество пропущенных значений.

Высокая размерность и большое количество данных из ЭМК имеют ценность для персонализированных исследований в области питания, поэтому важно разработать более эффективные методы работы с пропущенными данными. Современные методы вменения могут привести к ошибкам смещения и требуют значительных вычислительных ресурсов, а время выполнения этих методов увеличивается с объемом данных. Помимо улучшения методов, полезной может быть и более качественная документация, а также глубокие знания статистических методов, касающихся пропущенных данных. Все вышепечисленные задачи показаны на рис. 2.



Рис. 2. Задачи, решение которых необходимо для разработки СППР для автоматизации формирования рационов питания специализированных групп

Заключение. Таким образом, обобщены ключевые проблемы и задачи, связанные с разработкой системы поддержки принятия решений (СППР) для автоматизации составления рационов питания специализированных групп. Анализ показал, что создание такой системы требует учета множества факторов и решения различных задач, начиная с генерации принципиально новых подходов, основанных на внедрении передовых технологий, базирующихся на вычислительных данных, создания персонализированной вычислительной инфраструктуры питания, стандартизации данных и требований к обучению людей, а также устранением разреженности данных и необходимости в улучшенных методах обработки данных. Эти аспекты делают разработку СППР достаточно трудоемким, но необходимым процессом для создания эффективных и безопасных рекомендаций.

В рамках будущих исследований важно понимать, что проблемы, с которыми придется столкнуться, а именно: сбор и обработка данных, интеграция с внешними источниками, разработка алгоритмов персонализации, обеспечение точности рекомендаций, адаптация изменений данных и обеспечение пользовательского опыта невозможно решить без применения в создаваемых СППР моделей персонализации, которые способны адаптироваться к динамичным изменениям в состоянии пользователя, а также учитывать индивидуальные особенности и постоянно обновляться в ответ на новые научные данные.

Таким образом, дальнейшие исследования в области СППР для составления персонализированных рационов питания могут не только повысить эффективность рекомендательных систем, но и внести значительный вклад в профилактическое здравоохранение и улучшение качества жизни специализированных групп населения.

Список литературы

1. Orvados J.M., Ferguson L.R., Tai E. Sh., Mathers J.C. Personalised nutrition and health // BMJ. 2018. [Электронный ресурс] URL: https://www.bmj.com/content/361/bmj.k2173 (дата обращения: 10.05.2024).

2. Сычева В., Сычев В. Условия перехода к персонализированному питанию // ТППП АПК. 2020. №1. [Электронный ресурс] URL: https://cyberleninka.ru/article/n/usloviya-perehoda-k-personalizirovannomu-pitaniyu (дата обращения: 01.11.2024).

3. Генетические подходы к персонализации питания / А. К. Батурин, Е. Ю. Сорокина, А. В. Погожева, В. А. Тутельян // Вопросы питания. 2012. Т. 81, № 6. С. 4-11. EDN PUTCUD.

4. Ferguson LR, De Caterina R, Görman U, Allayee H, Kohlmeier M, Prasad C, et al. Guide and Position of the 25 ОБЗОРЫ | REVIEWERS Том № 2 1 2022 International Society of Nutrigenetics/Nutrigenomics on Personalised Nutrition: Part 1. Fields of Precision Nutrition. J Nutrigenet Nutrigenomics. 2016;9(1). P. 12–27. DOI: 10.1159/000445350. EPUB 2016 May 12. PMID: 27169401.

5. Betts J.A., Gonzalez J.T. Personalised nutrition: What makes you so special? Nutr. Bull. 2016;41. P. 353–359. DOI: 10.1111/nbu.12238.

6. Напольский И.Н. Персонализированное питание для профилактики и лечения метаболических заболеваний: возможности и перспективы / И.Н. Напольский, П.В. Попова // Российский журнал персонализированной медицины. 2022. Т. 2, № 1. С. 15-34. DOI 10.18705/2782-3806-2022-2-1-15-34. EDN YVMIVH.

7. McMahon G, Taylor AE, Davey Smith G, Munafò MR. Phenotype refinement strengthens the association of AHR and CYP1A1 genotype with caffeine consumption. PLoS One. 2014 Jul 30;9(7):e103448. DOI: 10.1371/journal.pone.0103448. PMID: 25075865; PMCID: PMC4116211. Vallée Marcotte B, Cormier H, Guénard F, Rudkowska I, Lemieux S, Couture P, Vohl MC. Novel Genetic Loci Associated with the Plasma Triglyceride Response to an Omega-3 Fatty Acid Supplementation. J Nutrigenet Nutrigenomics. 2016;9(1):1–11. DOI: 10.1159/000446024. Epub 2016 May PMID: 27160456. Keene KL, Chen WM, Chen F, Williams SR, Elkhatib SD, Hsu FC, Mychaleckyj JC, Doheny KF, Pugh EW, Ling H, Laurie CC, Gogarten SM, Madden EB, Worrall BB, Sale MM. Genetic Associations with Plasma B12, B6, and Folate Levels in an Ischemic Stroke Population from the Vitamin Intervention for Stroke Prevention (VISP) Trial. Front Public Health. 2014 Aug 6;2:112. DOI: 10.3389/fpubh.2014.00112. PMID: 25147783; PMCID: PMC4123605.

8. Cormier H, Rudkowska I, Paradis AM, Thifault E, Garneau V, Lemieux S, Couture P, Vohl MC. Association between polymorphisms in the fatty acid desaturase gene cluster and the plasma triacylglycerol response to an n-3 PUFA supplementation. Nutrients. 2012 Aug;4(8):1026–41. DOI: 10.3390/nu4081026. Epub 2012 Aug 17. PMID: 23016130; PMCID: PMC3448085.

9. Козлова Л. А., Казанцева О. В., Ткачева С. В., Лапенко И. В. Оценка суточных рационов питания у детей и подростков, проживающих в Ханты-Мансийском автономном округе // Вестник угроведения. 2013. №2 (12). [Электронный ресурс] URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sutochnyh-ratsionov-pitaniya-u-detey-i-podrostkov-prozhivayuschih-v-hanty-mansiyskom-avtonomnom-okruge (дата обращения: 01.11.2024).

10. Мелконян Ж.А., Потапова Ю.В. Рациональное питание в лечении сахарного диабета // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2013. №4. [Электронный ресурс] URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ratsionalnoe-pitanie-v-lechenii-saharnogo-diabeta (дата обращения: 01.11.2024).

11. Шурупин О.Ю., Васковский А.М., Казанский Г.В., Васковский А.М. Проблемы разработки интеллектуального интерфейса в системах персонификации питания // Сборник статей XXII международной научно-практической конференции «Российская наука в современном мире», часть I. Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2019. С. 214-216.

Половинкин Евгений Станиславович, аспирант, Россия, Москва, «РОСБИОТЕХ»,

Чванова Марина Сергеевна, д-р пед. наук, профессор, tmbtsu@gmail.com, Россия, Москва, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)

ANALYSIS OF PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT OF DSS FOR AUTOMATING THE FORMATION OF NUTRITION RATIONS FOR SPECIALIZED GROUPS

E.S. Polovinkin, M.S. Chvanova

The article discusses the key problems and features associated with the creation of a decision support system (DSS) aimed at automating the processes of forming food rations for specialized groups. The novelty of the work lies in the fact that for the first time the question has been raised about the key problems that arise when creating a DSS for selecting diets for these groups. The main focus is on problems associated with processing large amounts of nutrition data, the use of artificial intelligence methods, and the need to take into account individual needs. The difficulties of standardizing data and adapting the system to dynamic changes in user health parameters are analyzed. Problems related to data processing and standardization, personalization of recommendations, integration of artificial intelligence and bioinformatics, as well as taking into account genetic, physiological and environmental factors are considered.

Key words: automation of diet formation processes, personalized nutrition, artificial intelligence, decision support system.

Polovinkin Evgeny Stanislavovich, postgraduate, Russia, Moscow, ROSBIOTECH,

Chvanova Marina Sergeevna, doctor of pedagogical sciences, professor, tmbtsu@gmail.com, Russia, Moscow, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University)

УДК 621.3.078.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-520-521

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ ДЛЯ НЕЙРОНЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА, РЕАЛИЗУЮЩЕГО КВАЗИОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДОМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ

О.В. Горячев, К.Н. Калиничев

Рассмотрены вопросы разработки и модернизации регуляторов для приводов оптико-электронных систем (ОЭС), а также использования нейро-нечёткого регулятора для реализации квазиоптимального по быстродействию управления приводом ОЭС. В среде программирования Matlab реализована методика формирования базы знаний для синтеза нейро-нечёткого регулятора. Достоверность полученных результатов подтверждена компьютерным моделированием. Полученные результаты внедрены в учебный процесс подготовки специалистов по системам автоматического управления на кафедре САУ ТулГУ.

Ключевые слова: оптико-электронная система, нейро-нечёткий регулятор, нейро-нечёткая система, ПИД-регулятор, квазиоптимальное управление.

Проблема разработки и модернизации высококачественных регуляторов для приводов оптико – электронных систем в последнее время наиболее актуальна [8]. Это обусловлено сложностью создаваемых приводов ОЭС и их широким использованием [4].

В современных системах классический ПИД-регулятор в большинстве случаев не справляется с установленными требованиями, так как имеет ряд недостатков:

1. Ограниченность входных сигналов, при которой хорошо настроенный на один сигнал ПИД-регулятор не может с заданными требованиями отработать другой входной сигнал. Например, хорошо настроенный на ступенчатое воздействие регулятор будет плохо отрабатывать гармонический входной сигналом и наоборот.

2. Сложность настройки для качественной работы на всем диапазоне входных сигналов.

3. Зависимость качества функционирования регулятора от параметров системы. Если параметры системы неизвестны или изменяются, регулятор может работать некорректно.

4. ПИД-регуляторы подвержены влиянию шумов, которые могут привести к потере устойчивости системы.

Для устранения представленных недостатков предложены регуляторы на базе нечеткой логики, которые имеют ряд положительных свойств [5,9-11]:

1) система управления строится на базе правил «если – то», что облегчает настройку такого регулятора специалистом;

2) возможность объединить базой правил несколько входных переменных;

3) толерантность к шумам и помехам: нечеткая логика позволяет регуляторам игнорировать случайные и аномальные данные, что повышает их устойчивость к шумам и другим источникам ошибок;

4) понимание принципа работы регулятора не требует глубоких математических знаний;

В свою очередь, эти регуляторы имеют рад существенных недостатков, что ограничивает их применение в реальных системах. К таким недостаткам относятся:

1) недостаточность или неопределенность знаний об исследуемой системе;

2) сложность при формировании базы правил. Количество правил в нечетком регуляторе определяется количеством входных переменных и количеством описывающих их лингвистических переменных по зависимости:

$$A = x^n,$$

где А – количество правил, х – количество входных переменных, у - количество выходных переменных;

3) сложность в определении типа и параметров функции принадлежности.

Второй и третий пункт затрудняют проектирование нечетких регуляторов из-за большого количества параметров настройки.

Для решения возникающих проблем используются нейро-нечеткие регуляторы (ННР). В отличие от классических нечетких регуляторов ННР могут самообучаться и имеют хорошую степень интерпретируемости благодаря нечеткой логике. Корректно обученный нейро-нечеткий регулятор может обеспечить качественную работу системы на всем диапазоне входных сигналов без потери в точностных и динамических характеристиках.

При формировании обучающей выборки для ННР может использоваться метод «квазиоптимального» управления для быстро изменяющихся входных сигналов (режим переброса) и ПИ-регулятор для медленно изменяющихся входных сигналов (режим слежения).

Синтез ННР проводился на основе методов нечеткой логики и нейронных сетей с использованием пакета ANFIS системы Matlab и модели Simulink, которая представлена на рис. 1 [5,6,9-11].

В качестве обучающих входных сигналов выбраны следующие сигналы:

переброс на 90 градусов;

гармонический входной сигнал $\sin(0.5t)$;

гармонический входной сигнал $0.25\sin(5t)$;

линейно нарастающий входной сигнал.

Для синтеза квазиоптимального по быстродействию алгоритма управления, а также настройки ПИД регуляторов, объект управления приближенно описывается линейной моделью третьего порядка (1).

$$\begin{cases} L\frac{di}{dt} = U - i \cdot R - C_e \cdot \omega, \\ J\frac{d\omega}{dt} = C_m \cdot i - M_н, \\ \frac{d\varphi_н}{dt} = \omega_н, \\ \omega_н = \frac{\omega}{q}, \end{cases} \quad (1)$$

где L — индуктивности якорной обмотки, Гн; i — ток в якорной обмотке, А; U — напряжение, прикладываемое к якорной обмотке, В; R — активное сопротивление якорной обмотки; C_e — коэффициент противоЭДС, В·с/рад; ω — угловая скорость ротора, рад/с; J — приведённый момент инерции якоря, кг·м^2; C_m — коэффициент по моменту, Н·м/А; $M_н$ — момент нагрузки, Н·м; $\varphi_н$ — угол поворота нагрузки, рад; $\omega_н$ — угловая скорость поворота нагрузки, рад/с; q — передаточное число редуктора.

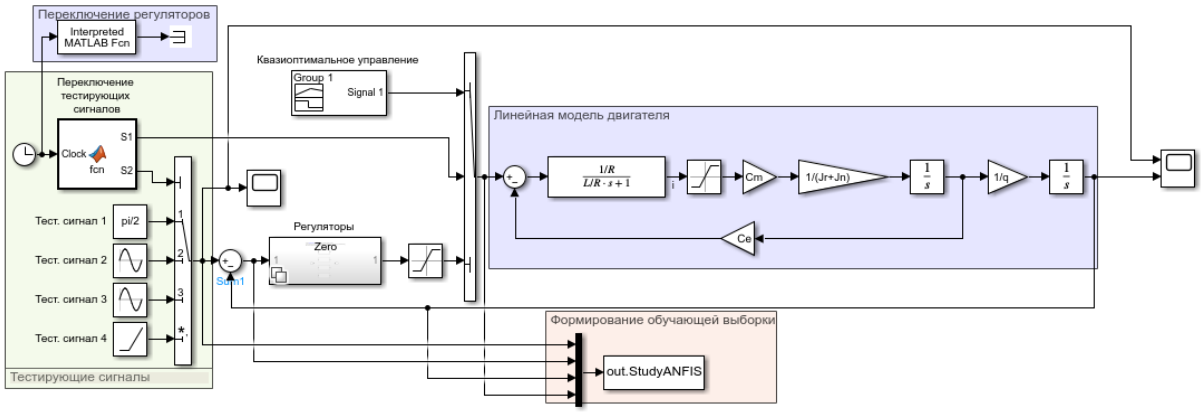


Рис. 1. Модель Simulink для формирования обучающей выборки НИР

Параметры математической модели подбираются либо на основе экспериментальных данных, если объект управления представлен как «черный ящик», либо если объект известен, вводятся в модель на основе паспортных данных. Тогда квазиоптимальный закон управления без учета малой постоянной времени для данной математической модели будет иметь вид:

$$U = KU_{max} \cdot sign\left[x_1 - \left(T_2 x_2 - KU_{max} T_2 \cdot ln\frac{KU_{max} + |x_2|}{KU_{max}}\right) \cdot sign(x_2)\right] \quad (2)$$

С учетом малой постоянной времени:

$$U = KU_{max} \cdot sign\left[y_3 + y_2(T_2 + \tau) + (y_1 - y_2)\tau - KU_{max} T_2 \ln\left(\frac{\left|y_2 + \frac{\tau}{T_2}(y_1 - y_2)\right| + KU_{max}}{KU_{max}}\right) \cdot sign\left(y_2 + \frac{\tau}{T_2}(y_1 - y_2)\right)\right], \quad (3)$$

где U – управляющее напряжение, U_{max} – максимальное напряжение питания, K – коэффициент усиления, T_2 – постоянная времени ОУ, τ – малая постоянная времени ОУ. x_1, x_2 – фазовые переменные, y_1 прямого физического аналога не имеет, но отождествляется с током, y_2 – скорость, y_3 – угол.

Для реализации квазиоптимального управления с учетом малой постоянной времени требуется знание о трех переменных состояния объекта управления, что в реальных системах не всегда является возможным.

В реальной системе полученное время начала торможения не является оптимальным, его коррекция происходит по экспериментальным данным.

Настройка ПИ-регулятора происходит аналогичным образом для каждого из сигналов, исключая переброса. Приближенные параметры рассчитываются сначала на модели, а затем корректируются по экспериментальным данным. Параметры регуляторов записываются в инвариантную подсистему (рис. 2), которая в процессе работы переключает регулятор в зависимости от входного сигнала.

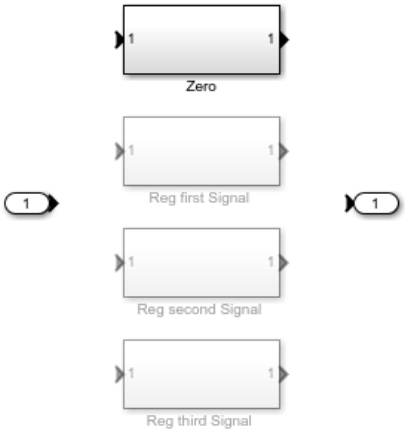


Рис. 2. Инвариантная подсистема для переключения регулятора

Для формирования обучающей выборки необходимо записать ошибки по всем входным координатам, которые будет использовать в своей работе нейро-нечеткий регулятор (угол, скорость), а также управляющее напряжение. Далее по полученным данным формируется обучающая выборка (рис. 3).

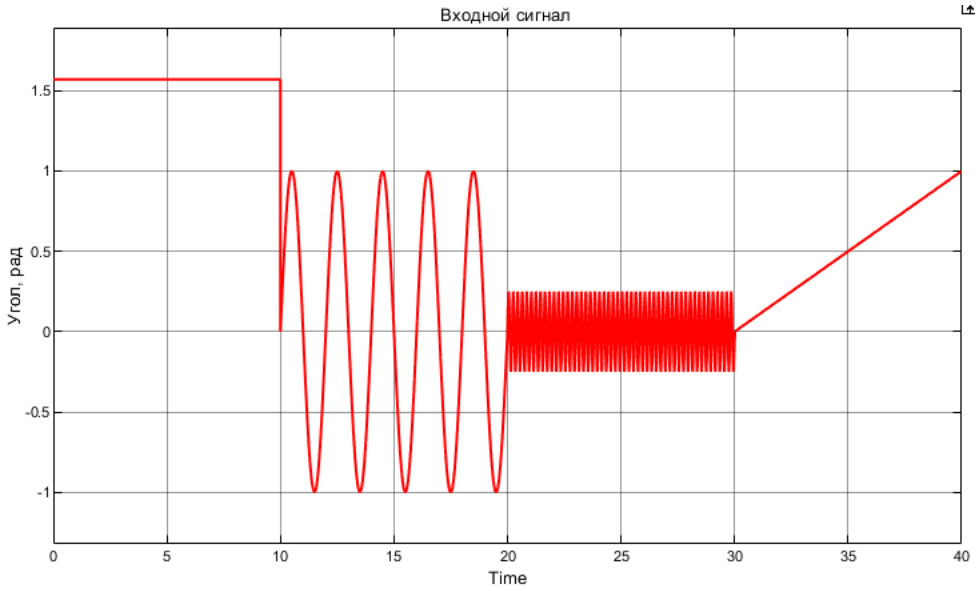


Рис. 3. Обучающая выборка на примере входного сигнала

Все данные, необходимые для обучения нечёткого регулятора, дискретизируются с частотой 1 кГц. Такая частота позволяет обеспечить достаточную точность дискретизации и при этом не сильно перегрузить систему.

Обучение нечеткого регулятора происходит с помощью средств Matlab [12]. Перед обучением необходимо выбрать метод кластеризации данных. В представленной работе выбран универсальный метод кластеризации. Далее требуется определить количество функций принадлежности (ФП) и их форму. Matlab позволяет это сделать для каждого входного сигнала по отдельности. В данной работе количество ФП не изменяется и равно 5, вид функций принадлежности одинаков и описывается функцией Гаусса.

Для систем, в которых закон управления изменяется в зависимости от входного сигнала, предложенный алгоритм настройки ННР может быть полезен, так как спроектированный таким образом регулятор заменяет все другие используемые регуляторы. Это в свою очередь позволяет избежать нежелательных эффектов, которые возникают при переключении одного закона управления на другой.

Названия функций принадлежности, их количество и диапазоны их работы до начала обучения нейро-нечёткой системы (ННС) представлены на рис. 4, вид ФП – на рис. 5-7 [1-3].

	Name	Range		MembershipFunctions
1	"InputSignal"	-1	1.5708	{1×5 fismf}
2	"Error"	-1.571	1.5708	{1×5 fismf}
3	"Speed"	-11.259	11.615	{1×5 fismf}

Рис. 4. Функции принадлежности до начала обучения

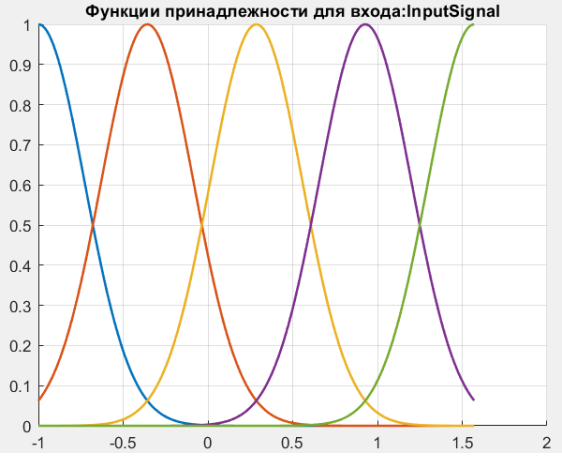


Рис. 5. Вид ФП «InputSignal» до обучения ННС

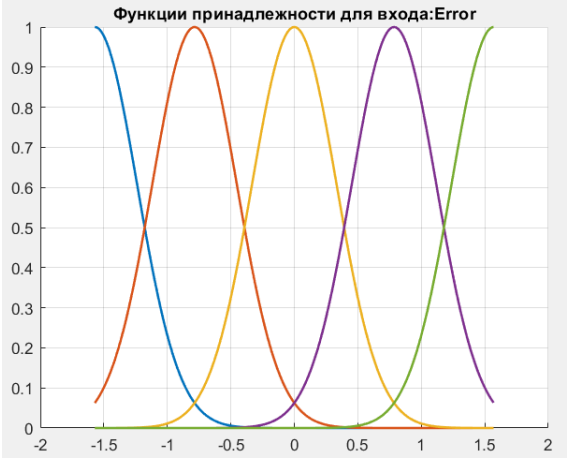


Рис. 6. Вид ФП «Error» до обучения ННС

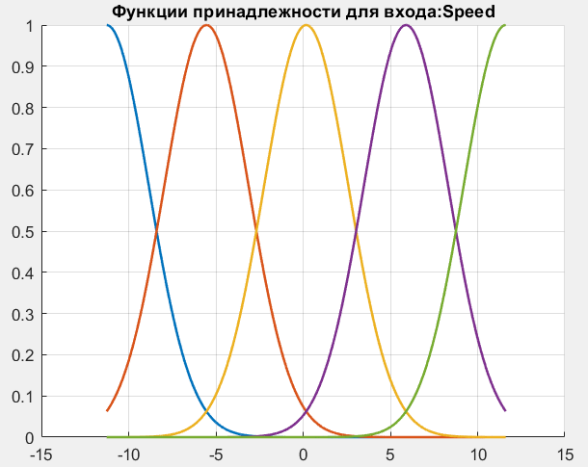


Рис. 7. Вид ФП «Speed» до обучения ННС

Вид функций принадлежности после обучения нейро-нечёткой системы показан на рис. 8-10.

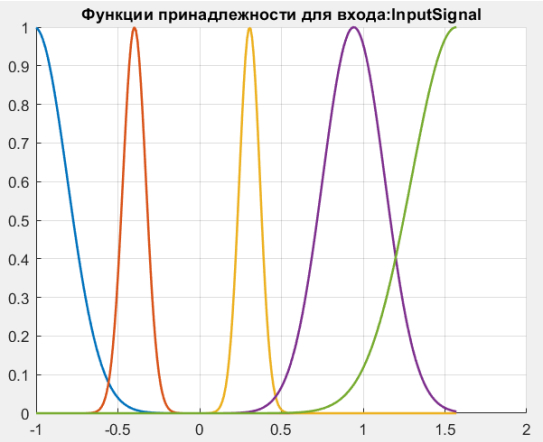


Рис. 8. Вид ФП «InputSignal» после обучения ННС

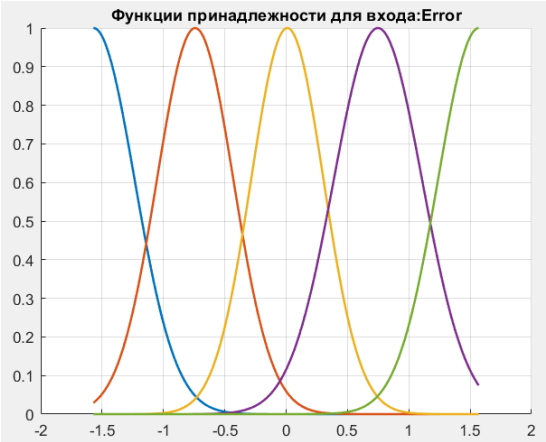


Рис. 9. Вид ФП «Error» после обучения ННС

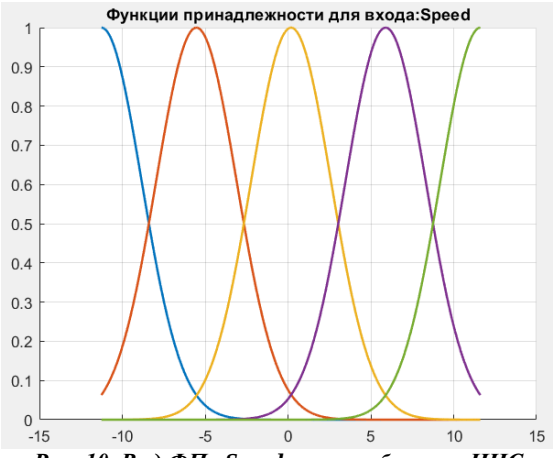


Рис. 10. Вид ФП «Speed» после обучения ННС

После 50 эпох обучения ННС среднеквадратичная ошибка обучения составляет 69,8 мрад (рис. 11).

Сравнение работы ПИД-регулятора и нейро-нечёткого регулятора после 50 эпох обучения представлено на рис. 12, разница между ошибками в этих случаях показана на рис. 13.

Из осциллограмм видно, что максимальная разница между ошибками при использовании классического ПИД-регулятора и нейро-нечёткого регулятора после 50 эпох обучения ННС составляет 150 мрад.

При увеличении количества эпох обучения нейро-нечёткой системы до 100 среднеквадратичная ошибка обучения равна 48,2 мрад (рис. 14), что почти в 1,5 раза меньше, чем при обучении ННС в 50 эпох.

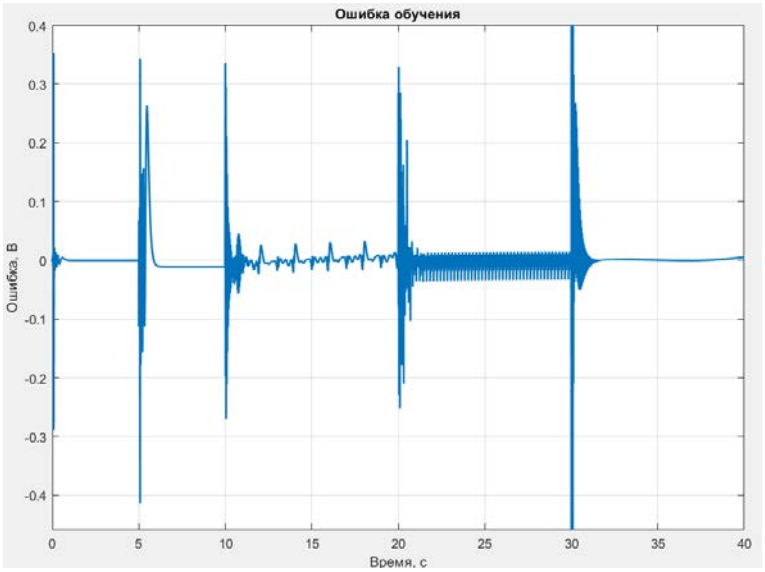


Рис. 11. Осциллограмма ошибки ННС после 50 эпох обучения

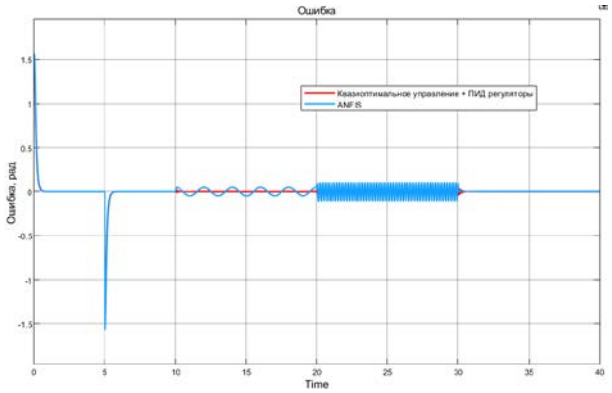


Рис. 12. Осциллограмма ошибок при работе ПИД-регулятора и ННР после 50 эпох обучения

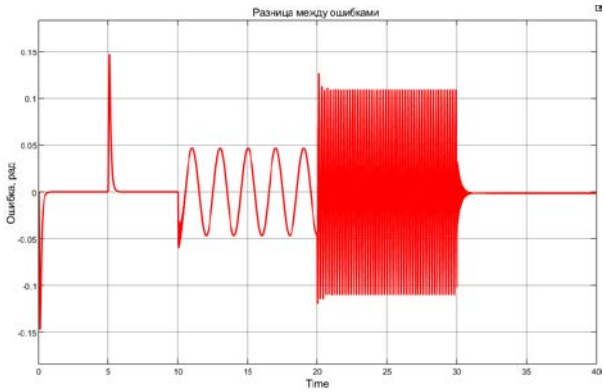


Рис. 13. Осциллограмма, показывающая разницу между ошибками при работе ПИД-регулятора и ННР после 50 эпох обучения

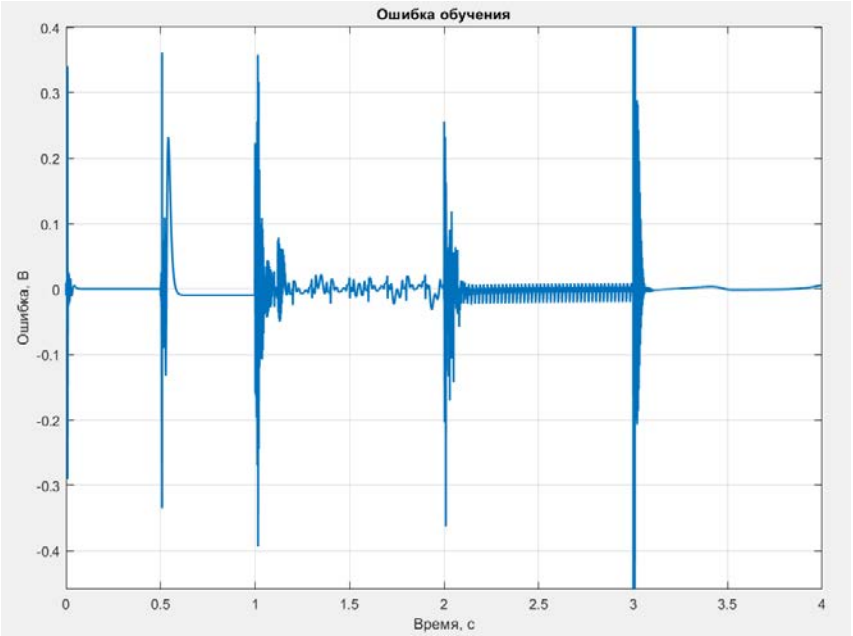


Рис. 14. Осциллограмма ошибки ННС после 100 эпох обучения

Сравнение работы ПИД-регулятора и нейро-нечёткого регулятора после 100 эпох обучения представлено на рис. 15, разница между ошибками в этих случаях – на рис. 16.

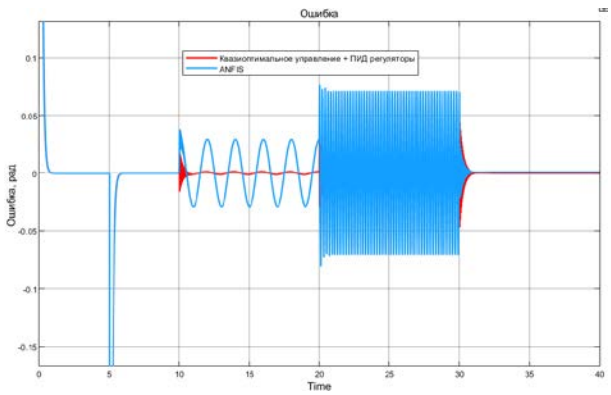


Рис. 15. Осциллограмма ошибок при работе ПИД-регулятора и ННР после 100 эпох обучения



Рис. 16. Осциллограмма, показывающая разницу между ошибками при работе ПИД-регулятора и ННР после 100 эпох обучения

Из осциллограмм видно, что максимальная разница между ошибками при использовании классического ПИД-регулятора и нейро-нечёткого регулятора после 100 эпох обучения ННС составляет 86 мрад, что в 1,77 раза меньше, чем при обучении в 50 эпох.

Выводы:

1.Рассмотрены вопросы использования нейро-нечёткого регулятора для реализации квазиоптимального по быстродействию управления приводом оптико-электронной системы.

2.Реализована методика формирования базы знаний для синтеза нейро-нечёткого регулятора в среде программирования Matlab. Предложенный подход упрощает построение регулятора, так как от оператора-настройщика не требуется формировать и оптимизировать базу правил, проводить подбор вида и параметров функций принадлежности.

3.Сформирована обучающая выборка, которая позволяет экспериментировать как с количеством функций принадлежности, так и с их видом. Однако, если количество эпох обучения недостаточно, установившаяся ошибка регулятора может быть большой. Увеличение количества эпох обучения приводит к значительному увеличению временных затрат на обучение нейро-нечеткой модели. При правильно подобранной конфигурации параметров время настройки регулятора сокращается в разы, что позволяет рассмотреть различные варианты регуляторов и выбрать наиболее подходящий для выполнения заданных требований.

Список литературы

1. Jang S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1993. V.23. P.665–685.
2. Sugeno M. Industrial Applications of Fuzzy Control. 1985.
3. Sugeno M., Kang G. T. Structure identification of fuzzy model // Fuzzy Sets and Systems. 1988. V.28. P.15–33.
4. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2019.
5. Воробьев В.В., Горячев О.В., Макаров Н.Н. Оптимизация следящих систем на классе входных сигналов с использованием нечеткой логики // Известия ТулГУ. Серия Проблемы специального машиностроения. Вып. 8. – Тула, ТулГУ, 2005. С. 164 – 168.
6. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Изд-во «Корона. Век», 2011. 368 с.
7. Горячев О.В. Интеллектуальные системы управления: учеб. пособие / О.В. Горячев; ТулГУ. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. 290 с.
8. Горячев О.В. Основы расчета и проектирования мехатронных модулей систем наведения и стабилизации: учеб. пособие / О.В. Горячев [и др.]; ТулГУ, Ин-т высокоточных систем им. В. П. Грязева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 233 с.
9. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб: Университет ИТМО, 2017. 81 с.
10. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник. / Под. ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. 744 с.
11. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 798 с.
12. ЦИТМ Экспонента – MATLAB&Simulink, Инженерные сервисы, Модельно-ориентированное проектирование. [Электронный ресурс] URL: https://www.mathworks.com/help/fuzzy/anfis.html (дата обращения: 25.05.2024).
13. Чемоданов Б.К. Следящие приводы: в 3 т., 2-е изд., доп. и перераб. / Б.К. Чемоданов [и др.]. М.: Издво МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 880 с.

Горячев Олег Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ovg@sau.tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Калиничев Кирилл Николаевич, аспирант, kalinicheff.kirill@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

A METHOD FOR FORMING A KNOWLEDGE BASE FOR A NEURO-FUZZY CONTROLLER THAT IMPLEMENTS QUASI-OPTIMAL SPEED CONTROL OF THE DRIVE OF OPTOELECTRONIC SYSTEMS

O.V. Goryachev, K.N. Kalinichev

The issues of development and modernization of regulators for drives of optoelectronic systems (OES), as well as the use of a neuro-fuzzy controller for the implementation of quasi-optimal speed control of the OES drive are considered. The Matlab programming environment implements a methodology for forming a knowledge base for the synthesis of a neuro-fuzzy regulator. The reliability of the results obtained was confirmed by computer modeling. The obtained results are implemented in the educational process of training specialists in automatic control systems at the Department of ACS TSU.

Key words: optoelectronic system, neuro-fuzzy controller, neuro-fuzzy system, PID controller, quasi-optimal control.

Goryachev Oleg Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, ovg@sau.tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kalinichev Kirill Nikolaevich, postgraduate, kalinicheff.kirill@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.3.078.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-526-527

АНАЛИЗ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ, ОПТИМИЗАЦИИ И АДАПТАЦИИ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

О.В. Горячев, К.Н. Калиничев

Рассмотрено применение ПИД-регуляторов в современных системах автоматического управления, методы их ручной и автоматизированной настройки, представлены варианты повышения эффективности таких регуляторов.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, оптимизация, переходная характеристика, синтез, передаточная функция, адаптивное управление, гибридный алгоритм, иммунный регулятор.

ПИД-регуляторы широко распространены в современных системах автоматического управления благодаря своей эффективности и универсальности. Они используются в различных областях промышленности, таких как энергетика, химическая промышленность, металлургия и других. Указанные регуляторы успешно применяются в высокоточных системах, например, для стабилизации лазерных резонаторов и интерферометров в оптике и фотонике, для управления гироскопами на основе микроэлектромеханических систем с замкнутым контуром, а также для определения характеристик механических резонаторов в сканирующей зондовой микроскопии.

Алгоритмы управления, реализующие структуру ПИД-регулятора, обеспечивают высокую точность и стабильность работы систем управления, а также позволяют учитывать различные факторы, влияющие на динамику системы. Реализация принципа управления по отклонению и применение в цепи сигнала ошибки ПИД-регулятора позволяет регулировать выходную координату системы в соответствии с желаемым заданным значением, корректировать в режиме реального времени параметры регулятора с целью повышения точности, стабильности и надежности функционирования.

Анализ известных литературных источников позволяет сделать вывод о том, что современные методики настройки, оптимизации и адаптации ПИД-регуляторов основываются на различных методах и моделях, среди которых можно выделить нечеткие модели, непараметрические прогнозирующие модели и экспертные системы. Кроме того, для решения некоторых существующих проблем в области автоматизации и управления ПИД-регулирование комбинируется с другими алгоритмами для разработки более функционально завершенных контроллеров.

Используемые на практике методы настройки ПИД-регуляторов можно классифицировать на следующие основные группы.

4.Классические методы настройки [3,5,6,19,21]:

1.1.Метод Циглера-Никольса [6,19] является эмпирическим и появился одним из первых методов расчёта параметров ПИД-регулятора. Он использует только два параметра для описания объекта, которые определяются по переходной характеристике объекта управления. Вместо переходной характеристики объекта можно использовать параметры, определяемые по переходной характеристике замкнутой системы управления в режиме автоколебаний, а затем по формулам определять параметры регулятора.

1.2.Метод Чина-Хронеса-Ресвика - это модифицированный метод Циглера-Никольса, который предполагает предварительное определение времени задержки и времени выравнивания по переходной характеристике объекта, а затем по формулам вычисляются коэффициенты регулятора.

1.3.Спектральный метод предполагает компенсацию нулями регулятора нежелательных полюсов объекта и придание желаемых динамических свойств путём размещения полюсов в нужных участках комплексной плоскости.

1.4.Метод Куна [5] включает два способа настройки: быструю и нормальную. Быстрая настройка регулятора предназначена для систем с объектами первого или второго порядка; нормальная настройка показывает хорошие результаты для систем управления с объектами более высокого порядка.

1.5.Метод Стогестада [3]. Принцип синтеза ПИД-регулятора с использованием метода Стогестада заключается в следующем: задание желаемого вида переходной характеристики замкнутой системы автоматического управления (желаемый вид описывается инерционным звеном первого порядка) путем выбора постоянной времени.

Настройка ПИД-регулятора по вышеописанным методам основывается на упрощённых моделях объекта. Кроме того, модели используют параметры, идентифицированные с некоторой погрешностью. Поэтому после расчёта параметров регулятора желательно сделать его подстройку.

5. Метаэвристическая оптимизация основана на решении задачи оптимизации с ограничениями (оптимизация роя частиц, эволюционные алгоритмы). Для таких методов требуется модель процесса, полученная заранее путём идентификации. К алгоритмам настройки без использования модели относятся методы, основанные на оптимизации нулевого порядка (поиск Фибоначчи).

6. Метод автоматической настройки ПИД-регулятора при использовании интегратора с реле и фильтров дискретизации. Основная идея состоит в том, чтобы вычислить две точки частотной характеристики, а затем использовать их для оценки коэффициента усиления системы и доминирующей постоянной времени, чтобы определить требуемую передаточную функцию (ПФ) с замкнутым контуром. Пользователь может выбрать желаемую постоянную времени замкнутого контура, но ни надежность, ни реакция на помехи не рассматриваются явно.

7. Экспериментальный метод настройки, основанный на использовании модели дробного порядка с временной задержкой для аппроксимацииповедения процесса. Предлагаемые эксперименты сначала выполняются в замкнутом контуре для получения частотной характеристики системы. Затем на основе этих данных вычисляется упрощенная модель дробного порядка с временной задержкой.

8. Итеративная оценка усиления на основе отклика по виртуальному времени (V-Tiger)и повторное проектирование [13].

Настройка данным методом проводится на генераторе напряжения,
который представлен математической моделью первого порядка без учета насыщения магнитопровода и других нелинейностей системы.

Последовательность выполнения настройки следующая:

1) инициализация ПИД-регулятора начальными коэффициентами;
2) анализ временных и частотных характеристик разомкнутой системы;
3) анализ реакции замкнутой системы на различные входные сигналы;
4) определение качества регулирования (перерегулирование, время переходного процесса на основе виртуального временотклика);
5) подстройка коэффициентов с помощью метода оптимизации роя частиц (PSO);
6) повторение алгоритма настройки с пункта 1 до тех пор, пока не будут получены требуемые характеристики переходного процесса.

9. Гибридный алгоритм (h-ASPSO) [4] – объединение двух алгоритмов оптимизации (оптимизации поиска атомов и оптимизации скопления частиц).

Оптимизация поиска атомов - это алгоритм, основанный на движении атомов в природе, который использует силы взаимодействия и взаимодействие с соседями для управления каждым атомом в популяции.

Оптимизация скопления частиц - это алгоритм интеллектуального анализа роя, который использует совокупность частиц для поиска оптимального решения посредством процесса социального обучения. Предлагаемый алгоритм направлен на достижение баланса между разведкой и эксплуатацией для повышения эффективности поиска. В данной статье описывается алгоритм атомарного поиска и метод его оптимизации.

Для алгоритма оптимизации необходимо провести минимизацию некоторой функции вида $X = [x_1, x_2, x_3] = [K_p, K_i, K_d]$ и уравнения для соответствующей оптимизации предлагаемого гибридного алгоритма:

$$ZLG(\rightarrow X) = (1 - e^{-\sigma}) \times \left(\frac{OS}{100} + e_{ss}\right) + e^{-\sigma} \times (t_s - t_r),$$

где $\sigma -$ коэффициент балансировки; $OS -$ процент превышения; $e_{ss} -$ ошибка в установившемся режиме; $t_s -$ время установления; $t_r -$ время нарастания напряжения; $ZLG(\rightarrow X) -$ функция затрат – это показатель, который может использоваться для извлечения оптимальных параметров ПИД-регулятора.

10. Метод размещения доминирующего полюса с модифицированным ПД-ПИД-регулятором и фильтром первого порядка [15]. Здесь рассматривается проблема управления системами высокого порядка без перегрузки по времени с помощью простых контроллеров с временной задержкой или без нее. В качестве основных принципов для систем управления без перегрузки по времени предложены и доказаны три положения:

1) необходимым условием для того, чтобы устойчивые, рациональные, строго правильные передаточные функции имели непересекающиеся ступенчатые отклики, является то, что доминирующие полюса этих передаточных функций должны быть реальными;

2) если передаточная функция замкнутого контура с одним интегратором в прямой цепи и единичной обратной связью имеет ступенчатую характеристику без превышения, то как действительные нули с разомкнутым контуром, так и действительные полюса с исключением полюса в начале координат должны лежать слева от доминирующих вещественных полюсов замкнутого контура.

3) Если $\mathrm{p} > 0, \alpha > 0, \beta \geq 0, k > 0,$ когда $p \leq \alpha$и $r \geq \frac{1}{2}$, передаточные функции $G_1(s) = \frac{k}{(s+p)((s+\alpha)^2+\beta^2)}$ и $G_2(s) = \frac{k((s+\alpha)^2+r\beta^2)}{(s+p)((s+\alpha)^2+\beta^2)}$ не будет иметь превышение ступенчатых откликов, где p – полюса ПФ с замкнутым контуром.

В соответствии с этими принципами предложена структура управления доминирующим полюсом, не перекрывающая его, имеющая три доминирующих полюса, т.е. один реальный полюс и пару комплексно-сопряженных полюсов слева от него, в то время как его нули и недоминантные полюса находятся слева от этих трех доминирующих полюсов на достаточном расстоянии.

11. Адаптивное управление с нечёткой ПИД-регуляторной структурой [14,18]. Такой метод может быть использован для отслеживания положения синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Этот новый метод управления представляет собой управление с переменной структурой в скользящем режиме на основе традиционного ПИД-регулятора.

Переменная структура разработана в соответствии с поверхностью режима скольжения, которая определяется уравнением состояния системы, поэтому можно компенсировать возмущение и неопределенность.

Учитывая вибрацию системы в скользящем режиме, для адаптивной настройки параметров ПИД-регулятора в режиме реального времени используется метод нечеткого вывода, который может уменьшить вибрацию и, соответственно, повысить точность управления и динамические характеристики системы.

Кроме того, по сравнению с традиционным управлением в скользящем режиме, в этом методе используется элемент нечеткого ПИД-регулирования для замены эквивалентного элемента управления в скользящем режиме с переменной структурой, что позволяет избежать снижения производительности управления, вызванного ошибкой моделирования и ошибкой параметров системы. Доказано, что этот алгоритм может сходиться к поверхности скольжения и гарантировать стабильность системы с помощью функции Ляпунова.

Результаты моделирования показывают, что адаптивное управление с нечеткой структурой и ПИД-регулятором обладает большей точностью управления и динамическими характеристиками по сравнению с традиционным методом управления, что значительно повышает надежность системы. Эффективность и практичность алгоритма проверяются методом быстрого создания контрольного прототипа на испытательном стенде для полуфизического моделирования.

12. Метод с использованием глубокой динамической нейронной сети для настройки параметров традиционного ПИД-регулятора в режиме реального временипозволяет преодолеть влияние неопределенностей в системе управления с замкнутым контуром [1].

Чтобы снизить вычислительную нагрузку на глубокую рекуррентную нейронную сеть, для оптимизации конфигурации применяется новый метод структурного обучения.

13. Метод оптимального проектирования и настройки нечеткого ПИД-регулятора для параллельного управления траекторией движения дельта-робота [17].

Из-за сложности структуры контроллера процедура разбивается на два этапа. На первом этапе происходит оптимальное проектирование ПИД-регулятора, которое получается путем размывания функций принадлежности с использованием переменной, называемой степенью размытия. Путем сравнения производительности контроллеров получается оптимальная структура.

На втором этапе, на основе двух определенных целевых функций, формулируется задача многоцелевой оптимизации, заключающаяся в определении коэффициентов масштабирования контроллера. Для решения задачи нелинейной многоцелевой оптимизации с ограничениями используется генетический алгоритм сортировки без доминирования.

Предложенный подход дает хорошую аппроксимацию оптимальных решений, и каждое решение является компромиссом между двумя целевыми функциями. Результаты моделирования показывают, что при использовании различных коэффициентов масштабирования, полученных на втором этапе, ПИД-контроллер с нечёткой логикой демонстрирует различные режимы управления, но все они обеспечивают лучшую производительность управления, чем обычно используемый ПИД-контроллер.

14. Синтез иммунного и ПИД-регуляторов [20], где коэффициенты ПИД-регулятора самонастраиваются за счет применения нечеткой логики. Применение модифицированного предиктора Смита, который осуществляется на основе управления с внутренней моделью, позволяет не учитывать влияние запаздывания при расчете управляющего устройства.

В данной работе применяется метод управления с внутренней моделью, основной идеей которого является явное включение в структуру системы управления модели с передаточной функцией реального объекта. Такая структура позволят вынести элемент запаздывания за пределы замкнутого контура, что дает возможность проектирования регулятора без учета запаздывания.

Нечеткий самонастраивающийся ПИД-регулятор является комбинацией нечеткого контроллера и классического ПИД-регулятора. В основе регулятора лежит использование нечетких правил, которые формулируются на основе свойств объекта управления. Для настройки нечеткого контроллера используется упрощенный метод нечеткого логического вывода Мамдани. Пропорциональный коэффициент ПИД-регулятора формируется с помощью иммунного регулятора.

Работа иммунного регулятора основана на процессах, протекающих в живых организмах. Искусственная иммунная система представляет собой интеллектуальную систему, разработанную на основе принципов и механизмов биологической иммунной системы, что способствует повышению надежности и способности адаптироваться в условиях с большим количеством возмущающих воздействий и неопределенностей. Эволюционные алгоритмы являются стохастическими методами оптимизации на основе естественной эволюции и наиболее приспособленных стратегий работы биологических организмов. Механизм иммунной системы явно действует подобно системам управления с обратной связью.

В данной работе рассматривается методика построения иммунного регулятора непрерывного действия, инициированная гипотезой о непрерывности иммунных процессов, имеющих место в организме человека.

Использование иммунного регулятора позволяет добиться безошибочного воспроизведения постоянного задающего воздействия. Однако спроектированный регулятор чувствителен к изменению свойств объекта в низкочастотной области, прежде всего к изменению коэффициента усиления объекта управления. К тому же он плохо ослабляет влияние на управляемую величину внешних возмущающих воздействий, так как по своей природе является безынерционным регулятором. В связи с этими недостатками в контуруправления добавляетсяПИД-регулятор и в дальнейшем используется комбинированный закон управления, который позволяет объединить положительные свойства одного и другого регуляторов.

Непрерывный иммунный самонастраивающийся регулятор объединяет в себе все достоинства включенных в него регуляторов и не имеет недостатков, характерных для каждого из этих регуляторов в отдельности. Он является самонастраивающимся за счет нечеткого регулятора. Такой регулятор применим при наличии задержек в

системе и при изменяющихся параметрах объекта управления. Однако с целью повышения робастности системы к неопределенности модели объекта, учитываемой как действие неизмеряемого возмущения и к шуму измерения, в обратную связь вводится фильтр. Если ошибки моделирования большие, то система может стать неустойчивой. При этом за счет фильтра можно избежать неустойчивой работы.

ПИД-регулирование является хорошим выбором для большинства промышленных систем управления, но иногда его недостаточно для управления сложной системой.

В статье «Beyond PID: 6 advanced strategies to add value to modern process control» [16] рассмотрены варианты повышения эффективности ПИД-регуляторов.

1. Настройка приборов для получения лучших результатов измерения. Хорошо настроенные приборы улучшают ПИД-регулирование. Входные данные определяют все, что происходит в остальной части контура управления. Измерение с помехами приведет к неточному вычислению погрешности. Если производный элемент управления представлен со значительным изменением или флуктуацией погрешности в течение одного цикла сканирования ввода-вывода, то управляющая переменная будет немедленно снижена до минимального или максимального значения. Регулировка или замена прибора, создающего шумный фотоэлектрический сигнал, может превратить неустойчивый контур управления в хорошо работающую систему.
2. Фильтрация сигналов. Этот подход предполагает применение временного фильтра к технологической переменной и замену мгновенного значения сигнала значением, усредненным за определенный промежуток времени.

При выборе схемы фильтрации целью должно быть сохранение как можно большего количества сигнала при одновременном устранении шума. Важно помнить, что интегральный показатель ПИД-регулятора – это отфильтрованная по времени оценка ошибки, поэтому фильтрация, по сути, применяется дважды.

3. Каскадное управление, использующее один ПИД-регулятор для управления другим.
4. Прямое управление: изменения, основанные на ожидаемом будущем.

Разработчики систем управления иногда точно знают, как технологическая переменная отреагирует на изменение управляющей переменной, и могут использовать эти знания в стратегии управления. ПИД-регуляторная система - это, по сути, схема обратной связи, в которой управляющая переменная изменяется, и результирующее изменение технологической переменной измеряется для вычисления нового значения погрешности. Часто, если пропорционально-интегральный контроллер испытывает проблемы, лучший способ улучшить его - добавить некоторую прямую связь вместо управления производной, если можно определить подходящую ведущую переменную прямой связи.

5. Планирование усиления. Для процессов, которые являются нелинейными в пределах заданного рабочего диапазона, управление ПИД-регулятором все еще может быть возможным, если каждый сегмент рабочего диапазона имеет по существу линейную характеристику. Пропорциональное, интегральное и дифференциальное усиления могут быть определены для каждого сегмента, а затем запрограммированы на изменение в ПИД-регуляторе по мере продвижения процесса по различным линейным областям.
6. Управление с использованием модели прогнозирования [2,8,9,11,12]. В модельно-прогнозирующем управлении используются современные контроллеры, помогающие процессам: более быстрые центральные процессоры, которые входят в состав современных систем. Современные контроллеры оснащены процессорами с высокими вычислительными возможностями, которые позволяют реализовать инновационную схему управления под названием модель прогнозирующего. В такой модели инженеры по системам управления совместно с экспертами по физическому процессу разрабатывают его математическую модель, которая находится в контроллере. Эта модель процесса в режиме реального времени позволяет логике управления прогнозировать все соответствующие изменения технологической переменной для различных настроек управляющей переменной на протяжении всего процесса. Эти прогнозы используются для определения наилучших изменений управляющей переменной, необходимых для достижения желаемого общего состояния процесса.

На основе рассмотренных статей можно сделать вывод, что в современных системах управления классические ПИД – регуляторы все чаще настраиваются и дополняются различными интеллектуальными системами управления, которые основаны на нечёткой логике, нейросетях, гибридных алгоритмах.

Классические методы настройки удовлетворительно работают в некотором ограниченном диапазоне, т.е. в линейной зоне, и хуже за пределами этой зоны. В свою очередь, интеллектуальные системы управления могут отрабатывать входные сигналы различного вида за счёт самообучения, автоматической подстройки и адаптации к изменяющимся воздействиям.

С другой стороны, алгоритмы управления, основанные на нечёткой логике, требуют больших вычислительных затрат, что повышает стоимость системы. Также возникает проблема обучения таких систем, так как для этого требуются большой массив данных и высокая вычислительная мощность. **Ставится вопрос устойчивости**.

Список литературы

1. Aghil Ahmadi, Reza Mahboobi Esfanjani. Automatic tuning of PID controllers using deep recurrent neural networks with pruning based on tracking error // IOPscience. Journal of Instrumentation. 2024. [Electronic resource] URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/19/02/P02028/pdf (дата обращения: 13.06.2024)
2. Arun Muraleedharan, Hiroyuki Okuda,Tatsuya Suzuki. Real-time implementation of randomized model predictive control for autonomous driving //IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2021. [Электронный ресурс] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Model_predictive_control (дата обращения: 16.06.2024)
3. Chien K.L., Jones J.A., Creswick J.B. An automatic control of generalized passive systems // IEEE Intern. conf. robotics and automation, 1952. P. 175-185.
4. Davut Izci, Serdar Ekinci, Abdelazim G. Hussien. Effective PID controller design using a novel hybrid algorithm for high order systems // PLOS ONE. 2023. [Electronic resource] URL: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0286060 (дата обращения: 13.06.2024)
5. Cohen G.H., Coon G.A. Theoretical consideration of retarded control // Journal of Fluids Engineering, V. 75, 1953. P. 827–834.

6. George Ellis. Control system design guide: using your computer to understand and diagnose feedback controllers. 2012. 456 p.

7. Huanchao Du, Bobo Feng, Jieshi Shen & Dan Li. Design of simple nonovershooting controllers for linear high order systems with or without time delay // Scientific Reports. 2024. [Electronic resource] URL: https://www.nature.com/articles/s41598-023-49802-x#Sec2 (дата обращения: 13.06.2024)

8. Julian Berberich, Johannes Köhler, Matthias A. Müller, Frank Allgöwer. Linear Tracking MPC for Nonlinear Systems—Part I: The Model-Based Case // IEEE Transactions on Automatic Control, v. 67(9), 2022. P. 4390–4405. [Electronic resource] URL: https://arxiv.org/abs/2105.08560 (дата обращения: 16.06.2024).

9. Lucia Sergio, Subramanian Sankaranarayanan, Limon Daniel, Engell Sebastian. Stability properties of multi-stage nonlinear model predictive control // Systems & Control Letters, v. 143(9), 2020. [Electronic resource] URL: https://www.researchgate.net/publication/343213495_Stability_properties_of_multi-stage_nonlinear_model_predictive_control (дата обращения: 16.06.2024).

10. Muhammad Abdillah, Tirta Jayadiharja, R Harry Arjadi, Herlambang Setiadi, Ramon Zamora, Yusrizal Afif. Principles of PID Controllers. 2023. [Electronic resource] URL: https://www.zhinst.com/sites/default/files/documents/202307/zi_whitepaper_principles_of_pid_controllers.pdf (дата обращения: 16.06.2024).

11. Muraleedharan Arun. Real-Time Implementation of Randomized Model Predictive Control for Autonomous Driving // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. v. 7(1), 2021. P. 11–20. [Electronic resource] URL: https://www.researchgate.net/publication/349726810_Real-time_Implementation_of_Randomized_Model_Predictive_Control_for_Autonomous_Driving (дата обращения: 16.06.2024).

12. Nikolaou Michael. Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs // Advances in Chemical Engineering, v. 26, Academic Press, 2001, P. 131-204 [Electronic resource] URL: https://www.researchgate.net/publication/222658127_Model_predictive_controllers_A_critical_synthesis_of_theory_and_industrial_needs (дата обращения: 16.06.2024).

13. Pasala Gopi, S. Venkateswarlu Reddy, Mohit Bajaj, Ievgen Zaitsev & Lukas Prokop. Performance and robustness analysis of V-Tiger PID controller for automatic voltage regulator // Scientific Reports. 2024. [Electronic resource] URL: https://www.nature.com/articles/s41598-024-58481-1#Bib1 (дата обращения: 13.06.2024).

14. Pei Pei, Pei Zhongcai, Tang Zhiyong, Gu Han. Position Tracking Control of PMSM Based on Fuzzy PID-Variable Structure Adaptive Control // Wiley Online Library. 2018. DOI: 10.1155/2018/5794067.

15. Roberto Sanchis. Optimal tuning of PID controllers with derivative filter for stable processes using three points from the step response. Control Engineering // ISA Transactions. V. 153, 2023. [Electronic resource] URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057823004627 (дата обращения: 13.06.2024).

16. William Hughes. Beyond PID: 6 advanced strategies to add value to modern process control // Control Engineering. 2023. [Electronic resource] URL: https://www.controleng.com/articles/beyond-pid-6-advanced-strategies-to-add-value-to-modern-process-control. (дата обращения: 13.06.2024).

17. Xingguo Lu, Ming Liu. Optimal Design and Tuning of PID-Type Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Delta Parallel Robots // SageJournals. 2016. DOI: 10.5772/63941.

18. Zhou Yi. A Summary of PID Control Algorithms Based on AI-Enabled Embedded Systems // Wiley Online Library, 2022. DOI: 10.1155/2022/7156713 (дата обращения: 16.06.2024).

19. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers // Journal of Fluids Engineering, 1942, V. 64. P. 759 – 768.

20. Бобиков А. И., Бубнова Т. С., Попова А. А. Непрерывный иммунный самонастраивающийся ПИД-регулятор для объекта с запаздыванием // Вестник РГРТУ. Вып. 59, 2017. С. 145 – 151.

21. Демин И.О., Саблина Г.В. Исследование методов настройки параметров ПИД-регулятора // Автоматика и программная инженерия, №1(31), 2020. С. 174 – 180.

Горячев Олег Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ovg@sau.tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Калиничев Кирилл Николаевич, аспирант, kalinicheff.kirill@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYTICAL REFERENCE ON THE METHODS OF SETTING UP PID CONTROLLERS

O.V. Goryachev, K.N. Kalinichev

The application of PID controllers in modern automatic control systems, methods of their manual and automatic configuration are considered, and options for improving the efficiency of such regulators are presented.

Key words: PID controller, optimization, transient response, synthesis, transfer function, adaptive control, hybrid algorithm, immune regulator.

Goryachev Oleg Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, ovg@sau.tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kalinichev Kirill Nikolaevich, postgraduate, kalinicheff.kirill@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 681.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-531-532

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ МИРА ПО ПРОБЛЕМЕ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Е.С. Половинкин, М.С. Чванова

В статье рассматривается динамика публикационной активности, посвященной разработке систем поддержки принятия решений (СППР) в пищевой промышленности. В ходе работы были выявлены временные промежутки появления публикаций по рассматриваемой теме и тенденции публикационной активности научного сообщества. Для анализа использовались базы и инструменты: Dimensions.ai, Lens.org и VOSviewer, с помощью которых были созданы диаграммы и библиометрические карты, иллюстрирующие публикационную активность авторов по ключевым словам, связанным с «decision support systems for the food industry» (системы поддержки принятия решений в пищевой промышленности), а также исследован уровень активности различных стран. Основной целью исследования является демонстрация публикационной активности авторов и потенциала применения СППР в пищевой промышленности как инструмента, способного поддерживать принятие решений в сложных ситуациях и имеющего значительные перспективы для внедрения в сферу пищевых технологий. Для достижения поставленных целей были использованы методы лингвистического анализа и кластерного анализа, а также обобщения и систематизации полученных данных. Результаты проведённого исследования позволили выделить основные направления, в которых сосредоточены научные публикации. Среди них можно выделить бизнес, экономику, медицину и сельское хозяйство. Сделан вывод о том, что исследования, связанные с «decision support systems for the food industry» (системы поддержки принятия решений в пищевой промышленности), характеризуются фрагментарностью и разрозненностью, что подчеркивает необходимость важность системного анализа данной предметной области. Установлено, что публикации, посвящённые автоматизации в исследуемой области, также носят разрозненный характер. Системы поддержки принятия решений в пищевой промышленности представляют собой инструмент с большим потенциалом, предназначенный для помощи людям с особенностями и предпочтениями в питании. Однако этот потенциал пока остаётся нереализованным.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, пищевая промышленность, терминологическая карта, публикационная активность.

В эпоху цифровой трансформации принятие управленческих решений в пищевой промышленности сталкивается со сложными задачами, постоянными изменениями и неполнотой данных, а также высокой динамикой процессов. Постоянная динамика затрудняет обработку большого объема информации, необходимого для управления технологическими и социальными процессами. Актуализируется потребность в системах обработки данных, создании интерактивных моделей и содействии в принятии решений – так называемых [1], систем поддержки принятия решений (СППР). Многообразие определений понятия СППР обусловлено разными точками зрения ученых из разных научных школ [2]. Считается, что на сегодня нет единого общепринятого определения СППР по причине зависимости от вида решаемых задач, категории пользователей и доступной информации для генерации данных и принятия решений[3].

К настоящему времени сложилось понимание того, что ключевыми задачами пищевой отрасли являются повышение эффективности, устойчивости и безопасности производства продуктов питания, внедрение передовых систем управления технологическими процессами, а также минимизация влияния человеческого фактора посредством использования современных компьютерных технологий [4].

Tripathi K.P. указывает на то, что потребность в принятии своевременных и обоснованных решений делает наличие системы, предоставляющей консультации и поддержку менеджерам, чрезвычайно полезным инструментом [5, 6]. Принятие решений в условиях сложных систем, таких как управление производственными процессами или сетями совместного использования ресурсов, нередко превышает наши когнитивные возможности [7]. Системы поддержки принятия решений помогают облегчить процесс, обеспечивая эффективную поддержку управления в сложной среде.

М.Р. Лабабиди в своих исследованиях отмечает, что системы поддержки принятия решений (СППР) представляют собой компьютерные информационные системы, специально разработанные для помощи менеджерам в выборе оптимального решения из множества возможных альтернатив [8, 9, 10]. СППР являются интерактивными компьютерными системами, включающими организованный набор моделей, процедур, программного обеспечения, баз данных, телекоммуникационных средств и устройств. Эти системы предназначены для поддержки лиц, принимающих решения, в неструктурированных или полуструктурированных задачах в бизнес-среде [11]. Э.Н. Эминова, И. Я. Гольфанд, Н. В. Крапухина, А.А. Морозов, В.П. Клименко, А.Л. Ляхов, С.П. Алешин определяют СППР, как системы, которые были разработаны специально для задач прогнозирования, планирования и контроля, позволяя компьютеру (а точнее, заложенным в него программам) выполнять часть работы, которую обычно выполняет человек — будь то менеджер, врач, провизор или другой специалист[12, 13, 14].

Многие специалисты рассматривают системы поддержки принятия решений (СППР) в более широком контексте, включая в них справочники, калькуляторы, компоненты бизнес-аналитики (BI) и системы контроля, поскольку эти инструменты также способствуют принятию решений. Однако ключевая особенность СППР заключается в том, что они не просто предоставляют информацию, но и формируют конкретные рекомендации для управленческих решений, генерируя своего рода управляющий сигнал[15, 16].

С.Н. Федирко отмечает в работе сложность и дороговизну в разработке СППР[17]. Также он указывает на то, что при проектировании и моделировании эффективной СППР нужно использовать надежные источники данных[18]. В то же время И Э. Гаглоева, М А. Ковалева, Ю В. Саханский, Ч А. Джериев показали, что интеграция в работу компании новой системы поддержки принятия решений может позволить сократить издержки, ускорить и оптимизировать основные бизнес-процессы [19].

Анализ публикационной активности исследователей мира по проблеме создания системы поддержки принятия решений в пищевой промышленности позволяет понять, что исследования в этой сфере были проведены фрагментарно и тема требует более тщательного изучения и рассмотрения вопросов по комплексному решению проблемы.

Методология. Анализ научных публикаций был выполнен по запросу «decision support systems for the food industry», что позволяет оценить степень вовлеченности мировой научной общественности в развитие систем поддержки принятия решений в пищевой промышленности и исследовать степень их автоматизации. Для этого использовались платформы Dimensions.ai и Lens.org, предоставляющие доступ к данным публикаций, индексируемых в таких базах, как Scopus и Web of Science. Эти ресурсы позволяют получить информацию о названиях статей, ключевых словах, авторах, странах, годах публикаций и других параметрах, необходимых для анализа. С помощью этих инструментов была собрана статистика по числу научных публикаций, содержащих выражение «decision support systems for the food industry», что дало возможность определить актуальность автоматизации процессов в пищевой промышленности и выделить основные направления исследований.

Изучение временных периодов публикаций позволило выявить начало интереса к данной теме и её динамику на сегодняшний день, появление новых терминов. Географическая карта публикаций показала, какие регионы лидируют в количестве исследований. Также статистика по авторам выделила наиболее продуктивных ученых в области автоматизации, а также позволила изучить их исследовательские предпочтения по направлениям и достижения.

Для построения библиометрической карты использовалась система VOSviewer, в которую были загружены данные из Lens.org, полученные на основе ключевого выражения «decision support systems for the food industry». Работая с VOSviewer, были созданы библиометрические карты, иллюстрирующие количество публикаций по странам, авторам, временным периодам, а также демонстрирующие связи между авторами, статьями и ключевыми терминами, которые позволили анализировать полученные результаты[20].

Результаты исследования. Для оценки состояния исследований по выбранной теме был проведен анализ статей из базы научных публикаций Lens.org, в которых использовалось ключевое выражение «decision support systems for the food industry». Поиск охватывал все поля публикаций (названия, содержания, аннотации). Ключевые слова для анализа могут быть получены двумя способами. Во-первых, они могут быть прямо указаны авторами в статьях для дальнейшего использования. Во-вторых, ключевые слова извлекаются автоматически из названий и аннотаций с помощью специальных алгоритмов, которые анализируют текст и выделяют наиболее значимые термины для последующего анализа. Эти слова могут быть сгруппированы в тематические кластеры, что позволяет визуализировать часто встречающиеся термины в виде информационной карты. Размер каждого кластера отображает количество публикаций, в которых встречаются соответствующие ключевые слова, что помогает выявить ключевые исследовательские направления в данной области.

Для отображения наиболее часто встречающихся терминов и анализа их взаимосвязей применяется система VOSviewer. На показанной диаграмме можно наблюдать, что ключевое слово «decision making» связано с рядом других понятий из различных научных областей, однако в последних исследованиях оно преимущественно используется в контексте сельского хозяйства.

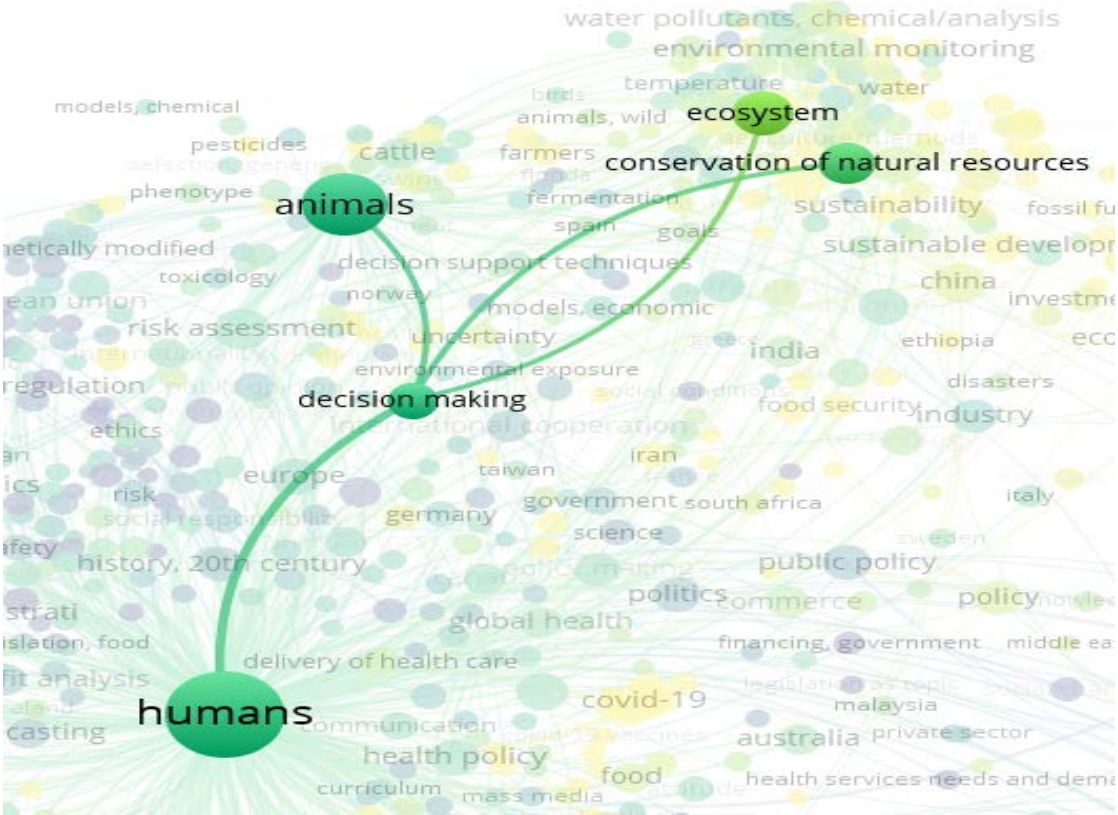


Рис. 1. Результат построения терминологической карты по ключевым словам «decision support systems for the food industry»

Составленная карта публикационной активности авторов, использующих ключевые слова «decision support systems for the food industry», а также их взаимосвязей, демонстрирует, что большинство авторов имеют связи с Paul B. Thompson. В период с 1988 по 2020 годы было опубликовано 13 научных статей, в которых обсуждается концепция «систем поддержки принятия решений для пищевой промышленности» в контексте сельского хозяйства. Тем не менее, по количеству опубликованных работ в данной области лидирует David Dickson, который с 1975 по 1998 годы выпустил 24 научных статьи.

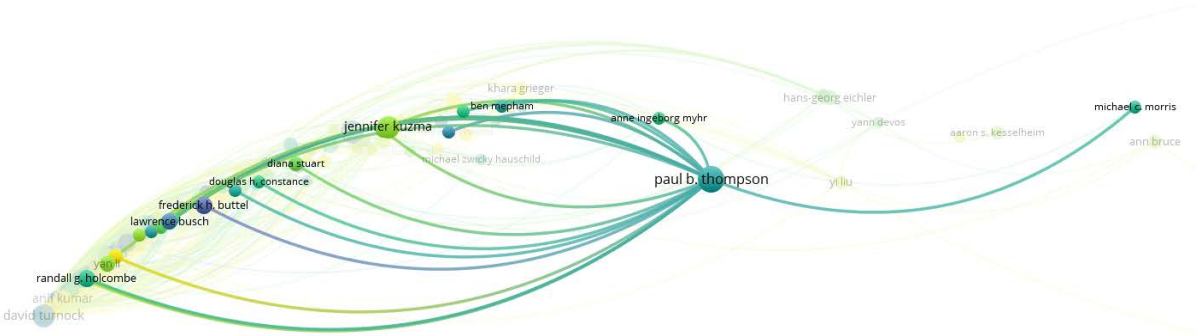


Рис. 2. Результат построения карты публикационной активности авторов по ключевым словам «decision support systems for the food industry»

Следующим этапом был анализ ключевых слов «decision support systems for the food industry» (системы поддержки принятия решений для пищевой промышленности). В ходе поиска в базе данных Lens.org было обнаружено более 33 тысяч публикаций, которые были экспортированы для дальнейшего изучения с использованием инструмента VOSviewer.

Анализ временных данных показывает, что первые исследования по этим ключевым словам начали появляться в 1970-х годах прошлого века. Однако их количество было ограниченным, что свидетельствует о начальной стадии применения СППР как нового инструмента в сфере пищевых технологий.

В период с 2010 по 2014 год количество публикаций оставалось относительно постоянным и варьируясь от 890 в 2010 году до 806 в 2014 году. С 2015 по 2018 год наблюдается небольшой рост, с 925 публикациями в 2015 году до 1060 в 2018 году. Начиная с 2019 года и до 2024 года наблюдается значительное увеличение числа публикаций, которое возросло с 1054 в 2019 году до 2019 в 2024 году, что свидетельствует о растущем интересе исследователей к данной теме. Предположительно, что этот рост может быть связан с такими факторами, как пандемия COVID-19, демографическое старение и увеличение числа людей, страдающих от заболеваний, требующих соблюдения определенных условий в области потребления продуктов питания, а следовательно, и их производства (см. Рис. 3).



Рис. 3. Результат распределения количества и дат публикаций на гистограмме по ключевым словам «decision support systems for the food industry» в системе Lens.org

Карта распределения публикаций показала, что ключевые направления исследования проблемы включают бизнес (6710 публикаций), экономику (6970 публикаций) и компьютерные науки (5571 публикация). Также замечен интерес к теме в медицине (4469 публикаций) и сельском хозяйстве (2886 публикаций). Примечательно, что область интересов пищевой отрасли связана с двумя последними.

Особое внимание привлекает распределение публикаций среди наиболее продуктивных авторов. Лидером является David Dickson с 24 научными работами, за ним следуют Jeffrey L Fox (22 публикации) и A A Shirov (13 публикаций). Эти данные помогают выявить активных участников в исследуемой области.

По данным на момент анализа, наибольшее число публикаций было зарегистрировано в США (8921 публикация), Великобритании (3035 публикаций) и Китае (1885 публикаций), а также в Российской Федерации (517 публикаций). Эти данные свидетельствуют о международном интересе к рассматриваемой теме и указывают на значительную распространенность исследований в разных странах.

Интересно, что понятие «системы поддержки принятия решений для пищевой промышленности» выходит за пределы автоматизации и начинает активно обсуждаться в контексте сельского хозяйства. Это подтверждается наличием новых публикаций, связанных с такими терминами, как «экосистема», «аграрные культуры», «аквакультура» и «климат».

Эти пересечения с различными областями подчеркивают значимость СППР в контексте пищевых технологий, особенно в аграрной сфере (см. Рис. 4). Для создания терминологической карты были использованы ключевые слова, которые встречались в более чем в 5 научных публикациях, что включало 1842 термина.

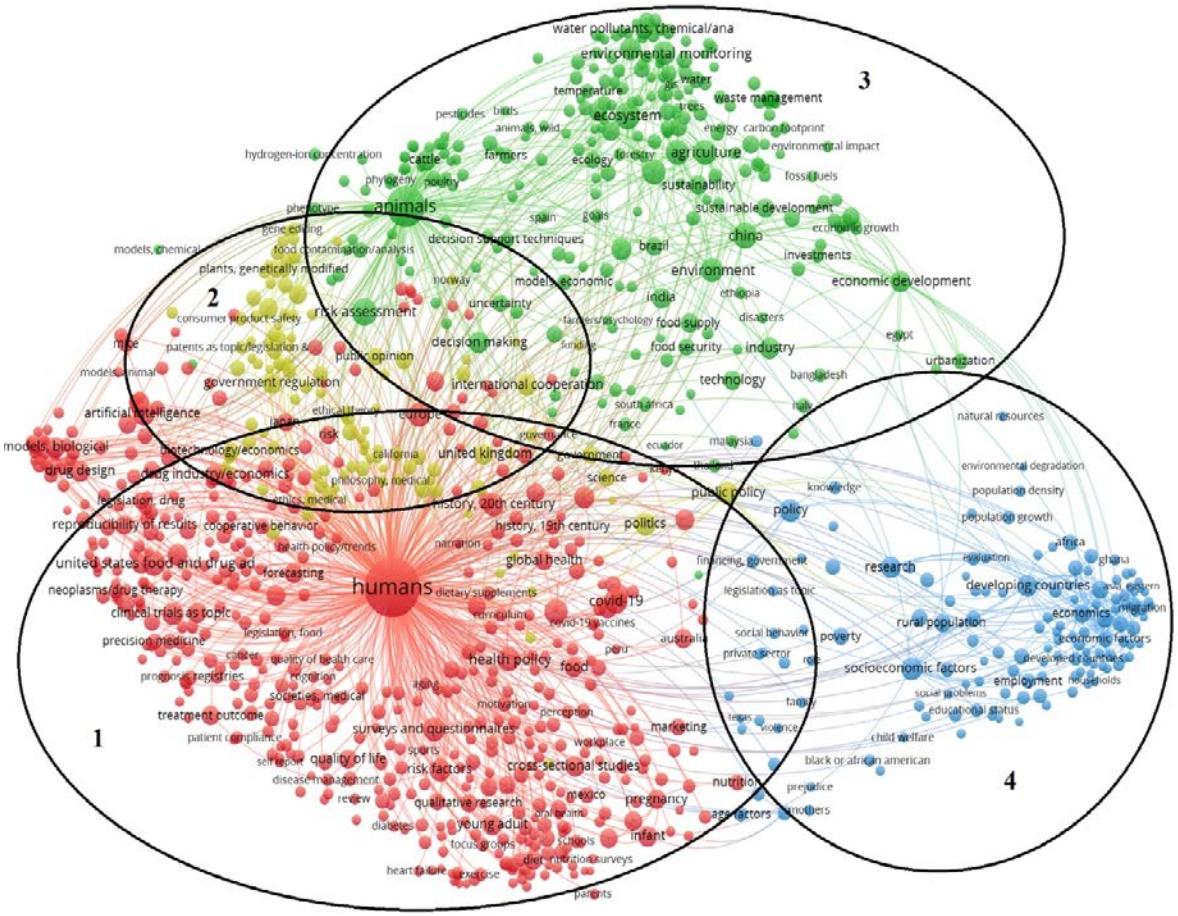


Рис. 4. Результат построения терминологической карты по ключевым словам с разделением по кластерам «decision support systems for the food industry»

Терминологическая карта, построенная по ключевым словам, состоит из четырех взаимосвязанных кластеров. Каждый кластер рассмотрен по отдельности, с последующей группировкой ключевых слов в соответствующие категории.

Кластер 1 - сфера здравоохранения: разработка лекарств, клинические испытания, лекарственная индустрия, биомедицинские и поведенческие исследования, политика здравоохранения.

Кластер 2 – медицинская сфера: биомедицина, генная инженерия, биотехнология, медицина, геномика, человеческие эксперименты.

Кластер 3 - сельскохозяйственная сфера: климат, биоразнообразие, фермы, рыбы, водоснабжение, экосистема, аграрные культуры, аквакультура.

Кластер 4 - социально-экономическая сфера: социальные проблемы, образовательный статус, демографические факторы, планирование опций, финансовый менеджмент.

В результате анализа с использованием VOSviewer было отобрано 35 ключевых слов, относящихся к теме «decision support systems for the food industry», и на основе этих данных была создана терминологическая карта для более глубокого изучения. Количество кластеров в данной карте не изменилось.

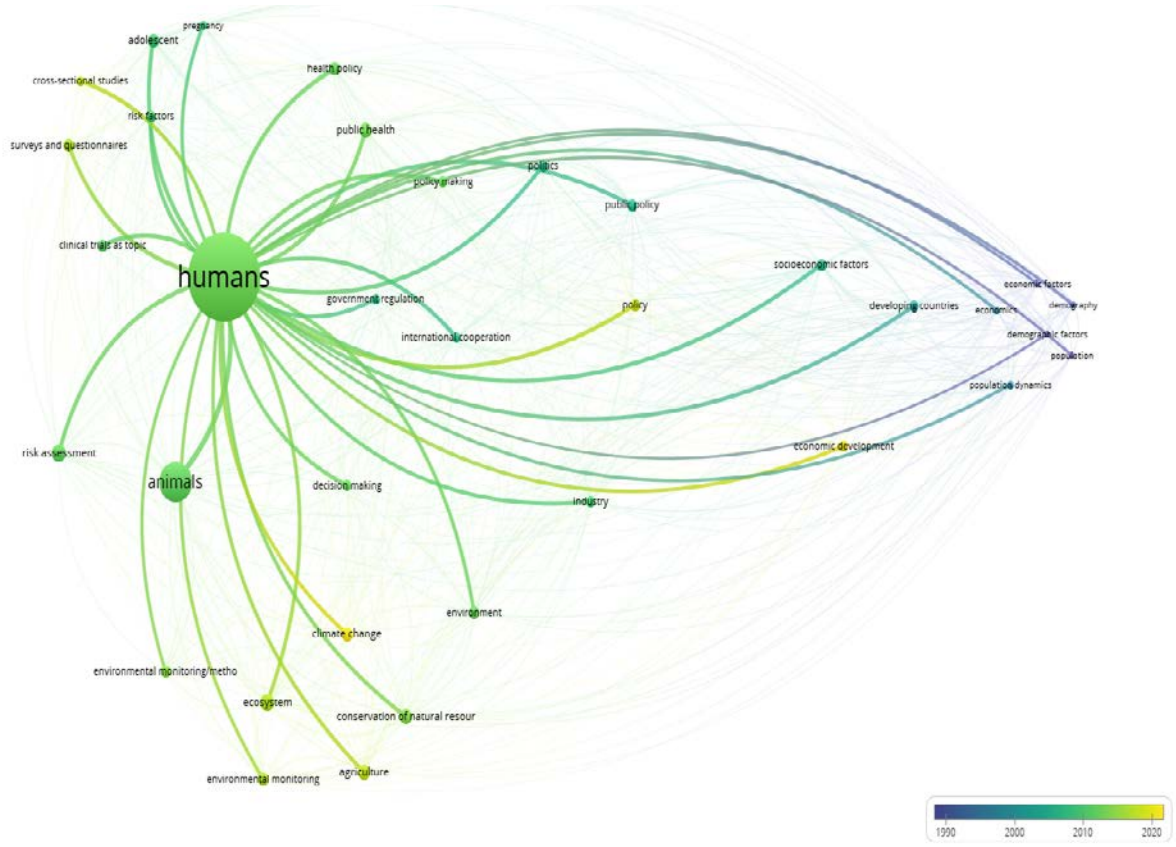


Рис. 5. Результат построения терминологической карты по 35 выбранным ключевым словам в контексте «decision support systems for the food industry»

Основным и центральным термином является «humans», который связан со всеми другими ключевыми словами. Термин «decision making» имеет связи с 28 другими терминами, из которых для нас наиболее важными являются «risk assessment», «industry», «economic factors», «health policy» и «public health».

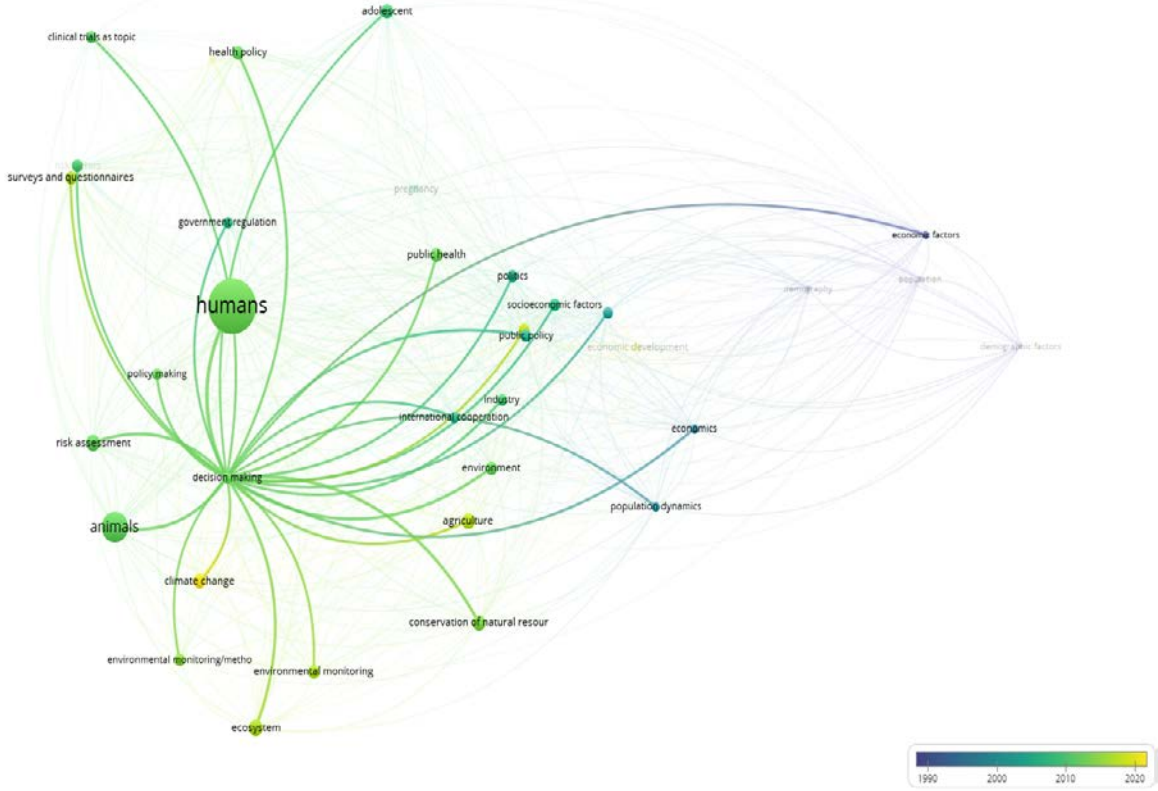


Рис. 6. Результат построения терминологической карты ключевого термина «decision making»

Согласно данным системы Dimensions.ai, наибольшее количество публикаций принадлежит следующим авторам: Witold Pedrycz (University of Alberta, Канада — 1136 публикаций), Gregory Yoke Hong Lip (University of Liverpool, Великобритания — 1067 публикаций), Shahrokh François Shariat (The University of Texas Southwestern Medical Center, США — 1020 публикаций), Gordon Henry Guyatt (McMaster University, Канада — 990 публикаций) и Saul I Gass (University of Maryland, College Park, США — 986 публикаций).

Ключевые области исследований, связанные с термином «decision making», включают: «Biomedical and Clinical Sciences» (2,060,841 публикаций), «Information and Computing Sciences» (1,983,287 публикаций), «Human Society» (1,605,505 публикаций), «Commerce, Management, Tourism and Services» (1,534,395 публикаций) и «Health Sciences» (1,265,247 публикаций).

Вывод. Исследования, посвященные «decision support systems for the food industry» (системам поддержки принятия решений в пищевой промышленности), характеризуются фрагментарностью, присутствием неопределенности в методологическом базисе и отсутствием целостности, что выделяет потребность в системном подходе и более детальном изучении данной области. Такой подход может способствовать более точному выявлению и осознанию сложных взаимодействий и связи между различными элементами этих систем. Например, технологий искусственных нейронных сетей, получающих широкое применение в системах поддержки принятия решений в областях медицины и пищевых производств.

Также стоит отметить, что анализ публикационной активности указывает на то, что наблюдается значительный интерес исследователей по всему миру именно в вопросах автоматизации и создания СППР для пищевых производств вообще и для специализированных групп (когорт) в частности. Вместе с тем, существует потребность в более глубоком исследовании этой предметной области. Реализация потенциала систем поддержки принятия решений для пищевых производств требует обоснования понятийного аппарата в связи с появлением новых компонентов системы, связанных с системным осмыслением методологического базиса.

Список литературы

1. Мандрыкин А.В. Повышение эффективности системы управления рисками предприятия на основе СППР // Организатор производства. 2007. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-sistemy-upravleniya-riskami-predpriyatiya-na-osnove-sppr (дата обращения: 29.11.2024).

2. Никифорова А.А. Перспективы развития систем поддержки принятия решений // E-Scio. 2022. №12 (75). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-sistem-podderzhki-prinyatiya-resheniy (дата обращения: 29.11.2024).

3. Маслобоев А.В., Цыгичко В.Н.Анализ информационной структуры и конфигурирование систем поддержки принятия решений региональных ситуационных центров // НиКСС. 2020. №2 (30). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-informatsionnoy-struktury-i-konfigurirovanie-sistem-podderzhki-prinyatiya-resheniy-regionalnyh-situatsionnyh-tsentrov (дата обращения: 29.11.2024).

4. Благовещенская М.М., Злобин Л.А. Информационные технологии систем управления технологическими процессами. М.: Высшая школа, 2015. 768 с.

5. Вакуленко Д.В., Кравец А.Г. Реинжиниринг бизнес-процессов агропромышленных предприятий в условиях сквозной цифровой трансформации // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/reinzhiniring-biznes-protsessov-agropromyshlennyh-predpriyatiy-v-usloviyah-skvoznoy-tsifrovoy-transformatsii (дата обращения: 29.11.2024).

6. Душкин К.Р., Душкин Р. В., Фадеева С., Лелекова В. А. Система поддержки принятия решений "фунгус" для распознавания грибов по описанию их внешнего вида // НАУ. 2021. №66-1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-podderzhki-prinyatiya-resheniy-fungus-dlya-raspoznavaniya-gribov-po-opisaniyu-ih-vneshnego-vida (дата обращения: 29.11.2024).

7. Мизюков Г.С., Чернов А.В., Бутакова М.А. Модель распределенной обработки запросов агентами систем поддержки принятия решений // ИВД. 2021. №11 (83). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/model-raspredelennoy-obrabotki-zaprosov-agentami-sistem-podderzhki-prinyatiya-resheniy (дата обращения: 29.11.2024).

8. Лабабиди М.Р. Система поддержки принятия решений (СППР) как инструмент принятия эффективных управленческих решений на промышленных предприятиях / М. Р. Лабабиди, Н. Р. Кельчевская // Весенние дни науки: сборник докладов. Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. С. 377-381. EDN DUHPNU.

9. Смыслов Д.М., Греченева А.В., Котов Я.С., Голбан А.Н., Макеев К.А. архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений для задач растениеводства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/arhitektura-intellektualnoy-sistemy-podderzhki-prinyatiya-resheniy-dlya-zadach-rastenievodstva (дата обращения: 29.11.2024).

10. Исаев В В., Печеницына Е.А., Тынченко В.С. Разработка функциональной и системной архитектуры системы поддержки принятия технологических решений для процесса элс // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. №. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-funktsionalnoy-i-sistemnoy-arhitektury-sistemy-podderzhki-prinyatiya-tehnologicheskih-resheniy-dlya-protsessa-els (дата обращения: 29.11.2024).

11. Tripathi K.P. Decision support system is a tool for making better decisions in the organization // Indian Journal of Computer Science and Engineering. 2017. № 21. С. 112-117.

12. Эминова Н.Э. Исследование проблем, затрудняющих внедрение систем поддержки принятия решений в практику управления апк // УЭПС. 2020. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-problem-zatrudnyayuschih-vnedrenie-sistem-podderzhki-prinyatiya-resheniy-v-praktiku-upravleniya-apk (дата обращения: 29.11.2024).

13. Морозов А.А., Клименко В.П., Ляхов А.Л., Алешин С.П. Состояние и перспективы нейросетевого моделирования СППР в сложных социотехнических системах // ММС. 2010. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/costoyanie-i-perspektivy-neyrosetevogo-modelirovaniya-sppr-v-slozhnyh-sotsiotehnicheskih-sistemah (дата обращения: 29.11.2024).

14. Гольфанд Инна Яковлевна, Крапухина Нина Владимировна Разработка СППР на основе управления стоимостью предприятия в условиях неопределенности // Прикладная информатика. 2009. №5. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sppr-na-osnove-upravleniya-stoimostyu-predpriyatiya-v-usloviyah-neopredelennosti (дата обращения: 29.11.2024).

15. Галченков А.С., Новицкий В.О., Кондратьев Е.А. Сервисы поддержки принятия решений по диагностике и лечению заболеваний и их практическое примененииена примере ХБП 5Д // Врач и информационные технологии. 2020. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/servisy-podderzhki-prinyatiya-resheniy-po-diagnostike-i-lecheniyu-zabolevaniy-i-ih-prakticheskoe-primeneniena-primere-hbp-5d (дата обращения: 29.11.2024).

16. Загорулько Г.Б. Программная среда и методика разработки интеллектуальных сппр // Проблемы информатики. 2020. №2 (47). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/programmnaya-sreda-i-metodika-razrabotki-intellektualnyh-sppr (дата обращения: 29.11.2024).

17. Федирко С.Н. Реализация системы поддержки принятия решений для управления информационной безопасностью организации на основе бесплатно распространяемого программного обеспечения // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1. Математика. Механика. Информатика. 2020. №1 (34). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/realizatsiya-sistemy-podderzhki-prinyatiya-resheniy-dlya-upravleniya-informatsionnoy-bezopasnostyu-organizatsii-na-osnove-besplatno (дата обращения: 29.11.2024).

18. Федирко С.Н. Технологии управления данными при проектировании системы поддержки принятия решений // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1. Математика. Механика. Информатика. 2020. №2 (35). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-upravleniya-dannymi-pri-proektirovanii-sistemy-podderzhki-prinyatiya-resheniy (дата обращения: 29.11.2024).

19. Гаглоева И.Э., Ковалева МА., Саханский Ю.В., Джериев Ч.А. Разработка алгоритма оптимизации бизнес-процессов ИТ-компании и модели информационной системы поддержки принятия решений // ИВД. 2023. №10 (106). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritma-optimizatsii-biznes-protsessov-it-kompanii-i-modeli-informatsionnoy-sistemy-podderzhki-prinyatiya-resheniy (дата обращения: 29.11.2024).

20. Скворцов А.А. Анализ публикационной активности исследователей мира по проблеме формирования цифровой образовательной экосистемы для студентов университета / А. А. Скворцов, А. А. Молчанов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. 2023. Т. 28, № 4. С. 770-782. DOI 10.20310/1810-0201-2023-28-4-770-782. EDN WOJQXV.

Половинкин Евгений Станиславович, аспирант, Россия, Москва, «РОСБИОТЕХ»,

Чванова Марина Сергеевна, д-р пед. наук, профессор, tmbtsu@gmail.com, Россия, Москва, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)

ANALYSIS OF PUBLICATION ACTIVITY OF RESEARCHERS OF THE WORLD ON THE PROBLEM OF CREATING A DECISION SUPPORT SYSTEM IN THE FOOD INDUSTRY

E.S. Polovinkin, M.S. Chvanova

The article examines the dynamics of publication activity devoted to the development of decision support systems (DSS) in the food industry. In the course of the work, time intervals for the appearance of publications on the topic under consideration and trends in the publication activity of the scientific community were identified. The following databases and tools were used for the analysis: Dimensions.ai, Lens.org and VOSviewer, with the help of which charts and bibliometric maps were created illustrating the publication activity of authors for keywords related to "decision support systems for the food industry" (adoption support systems decisions in the food industry), and also examined the level of activity of different countries. The main goal of the study is to demonstrate the publication activity of the authors and the potential of using DSS in the food industry as a tool that can support decision-making in complex situations and has significant prospects for implementation in the field of food technology. To achieve the set goals, methods of linguistic analysis and cluster analysis were used, as well as generalization and systematization of the data obtained. The results of the study made it possible to identify the main areas in which scientific publications are concentrated. Among them are business, economics, medicine and agriculture. It is concluded that research related to "decision support systems for the food industry" (decision support systems in the food industry) is characterized by fragmentation and disunity, which emphasizes the need for the importance of systematic analysis of this subject area. It has been established that publications devoted to automation in the area under study are also scattered. Decision support systems in the food industry represent a tool with great potential to help people with dietary characteristics and preferences. However, this potential still remains unrealized.

Key words: decision support system, food industry, terminology map, publication activity.

Polovinkin Evgeny Stanislavovich, postgraduate, Russia, Moscow, ROSBIOTECH,

Chvanova Marina Sergeevna, doctor of pedagogical sciences, professor, tmbtsu@gmail.com, Russia, Moscow, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management (First Cossack University)

УДК 62-503.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-538-539

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ОРИЕНТАЦИЕЙ ПО ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЮ РОТОРА

К.В. Лицин, А.А. Клименко, И.А. Ореховский

На данный момент существует несколько способов управления электрическими приводами переменного тока. Среди них выделяются скалярный метод управления и векторный с ориентацией по потокосцеплению ротора. За счет своих преимуществ, а именно более высокой точности и повышенной динамике системы, векторная система управления превосходит скалярную. Есть несколько способов построения модели векторной системы управления и каждая имеет как преимущества, так и недостатки. Представлены варианты построения модели векторной системы управления по потокосцеплению ротора в виде передаточных функций и на основе готовой модели асинхронного двигателя Matlab Simulink. Проанализированы структуры разработанных моделей. Приведено описание элементов рассмотренных моделей и обосновано их построение. Проведён анализ качественных показателей рассмотренных моделей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, векторное управление, схема замещения, скорость, система управления.

Введение и постановка задач. В настоящее время в системах электроприводов используется два основных типа управления: скалярное и векторное по потокосцеплению ротора. Выделяют ещё и прямое управление моментом (DTC), которое характерно для ряда электроприводов зарубежного производства, но в связи с политикой импортозамещения его применение весьма ограничено [1-4].

Векторное управление по потокосцеплению ротора за счёт контроля моментообразующего тока и потокообразующего тока позволяет улучшить динамику, которая является главным недостатком и неподконтрольна при скалярном управлении [5-7].

Векторное управление по потокосцеплению ротора электродвигателя имеет ряд преимуществ [8,9]:

- высокая точность управления;
- улучшенная динамика системы;
- гибкость и масштабируемость;
- снижение энергопотребления;
- устойчивость к внешним воздействиям;
- возможность работы на низких скоростях.

Целью статьи является проведение сравнительного анализа векторной схемы управления асинхронным двигателем с ориентацией по потокосцеплению ротора на различных моделях Matlab Simulink.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– проанализировать способы частотного управления асинхронным электроприводом;

– разработать и провести анализ модели асинхронного векторного электропривода в операторной форме;

– разработать и провести анализ имитационной модели асинхронного векторного электропривода;

Научная новизна работы заключается в:

– разработке и апробировании алгоритмов построения векторного управления асинхронного электропривода на базе имитационного моделирования;

– разработке модели частотного управления асинхронного электропривода на базе Matlab Simulink.

Выбор объекта исследования. В качестве объекта исследования берем двигатель модели 5А225М2. Его технические характеристики показаны в таблице 1.

Таблица 1

Паспортные данные двигателя 5А225М2

Параметры	Значения
Номинальная мощность $P_Н$, кВт	55
Номинальное линейное напряжение $U_Н$, В	660
Синхронная скорость n_0, об/мин	1000
Коэффициент мощности cos(φ)	0,92
КПД η, %	91
Номинальное скольжение $S_н$, %	2,1
Кратность пускового момента $M_{пуск}$	1,2
Кратность максимального момента M_{max}	2,2
Кратность пускового тока $I_{пуск}$	7,5
Момент инерции электродвигателя $J_{дв}$, кг·м ^{2}	0,25

В таблице 2 показаны параметры схемы замещения необходимые для САР [10].

Таблица 2

Параметры схемы замещения электродвигателя

Параметры	$X_μ$	В номинальном режиме			
		Статора		Ротора	
В относительных единицах	5,6	R_1	X_1	R'_2	X'_2
		0,026	0,092	0,019	0,12

Модель векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора в виде передаточных функций

Полная структурная схема векторной САР скорости АД представлена на рисунке 1.

Основные блоки структурной схемы:

- модель электродвигателя при векторном управлении;
- модель преобразователя частоты;
- модель системы управления.

Управление асинхронным двигателем происходит через два внешних контура регулирования – модулем потокосцепления и скорости ротора, а так-же два подчиненных им контура тока (ток статора). Чаще всего токи статора обозначают через I_X и I_Y.

Токи вращаются с синхронной скоростью поля статора двигателя. Сами токи находятся в осях X и Y.

Данный вид управления обеспечивает регулирование модуля вектора потокосцепления ротора и скорости ротора. При этом прямая пропорциональность между моментом двигателя и составляющей намагничивающей силы статора остаётся.

Задание, для формирования электромагнитного момента, формируется выходным сигналом РС (регулятора скорости). На входе регулятора скорости выполняется сравнение сигнала задания скорости UЗС с выхода задатчика интенсивности и сигнал пропорциональный реальной скорости двигателя. Для постоянного поддержания момента при изменении потокосцепления ротора нужно ввести дополнительный блок. Он будет производить деление сигнала с выхода регулятора скорости на потокосцепление, на выходе будет выходит сформированный сигнал составляющей тока статора I_Y.

Для формирования сигнала для составляющей тока статора по оси X нужно использовать регулятор потока. На входе регулятора сравниваются два сигнала (сигнал задания и сигнал потокосцепления ротора).

После этого сигналы задания I_{1x3} и I_{1y3} сравниваются с текущими токами статора. Сравнение выполняется в регуляторах тока. Выходные сигналы с регулятора определяют задания составляющих напряжения статора в координате XY.

Для получения желаемых переходных процессов необходимо выполнить синтез регуляторов векторной системы управления. Полная структурная схема векторной САР показана на рисунке 1.

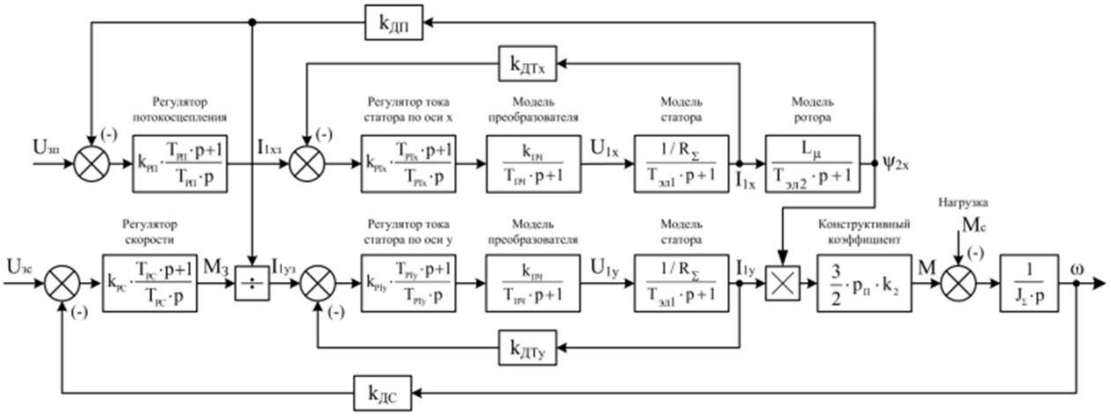


Рис. 1. Структурная схема векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора в виде передаточных функций

В результате проведённых расчётов на основе метода двухконтурной системы, известной из теории электропривода и теории автоматического управлении, синтезируем модель, показанную на рисунке 2.

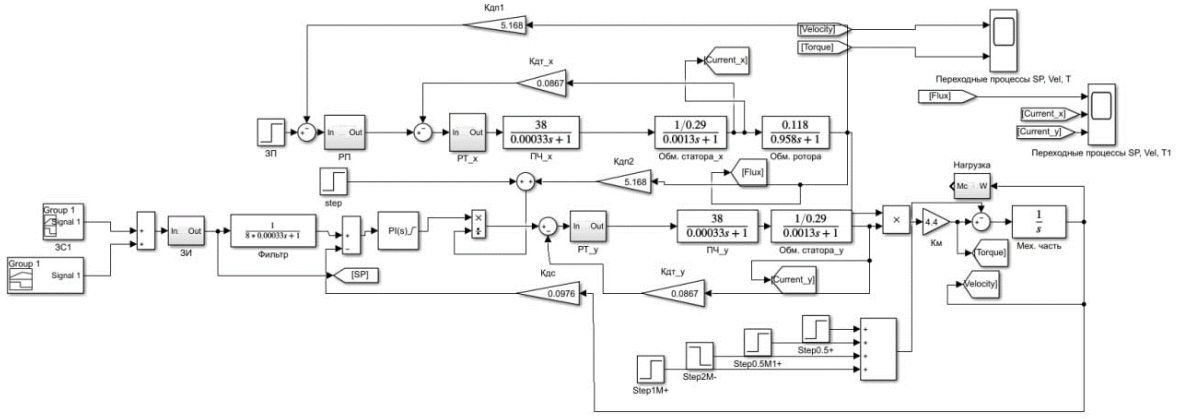


Рис. 2. Модель векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора в виде передаточных функций в Matlab Simulink

Полученные графики переходных процессов скорости и момента при учете разгона и торможения представлены на рисунке 3.

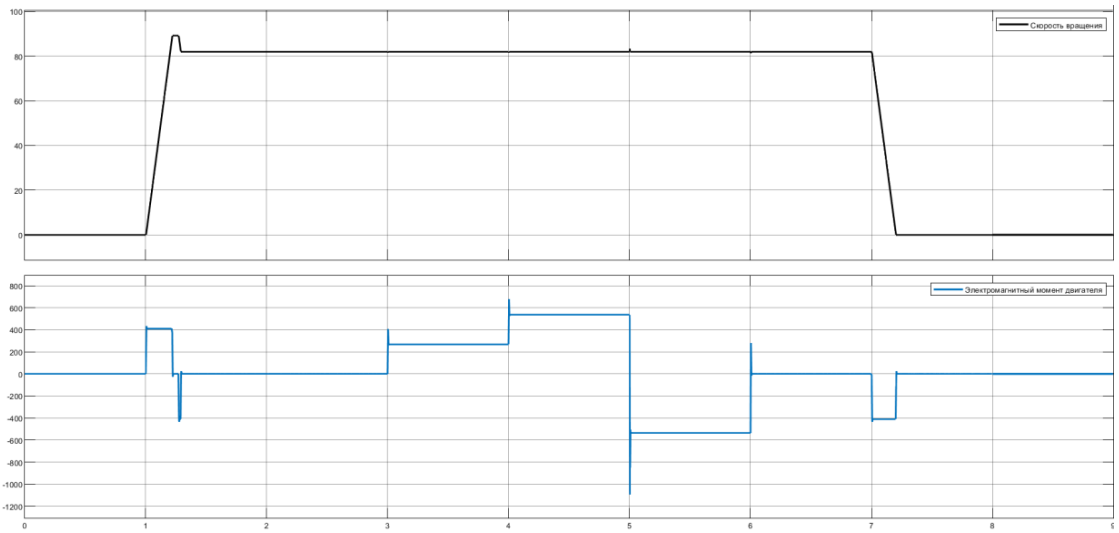


Рис. 3. Переходный процесс скорости и момента для модели векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора в виде передаточных функций в Matlab Simulink

Модель векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора на базе готовой модели асинхронного двигателя. Функциональная схема системы электропривода с векторным управлением с ориентацией по потокосцеплению ротора и датчиком скорости представлена на рисунке 4.

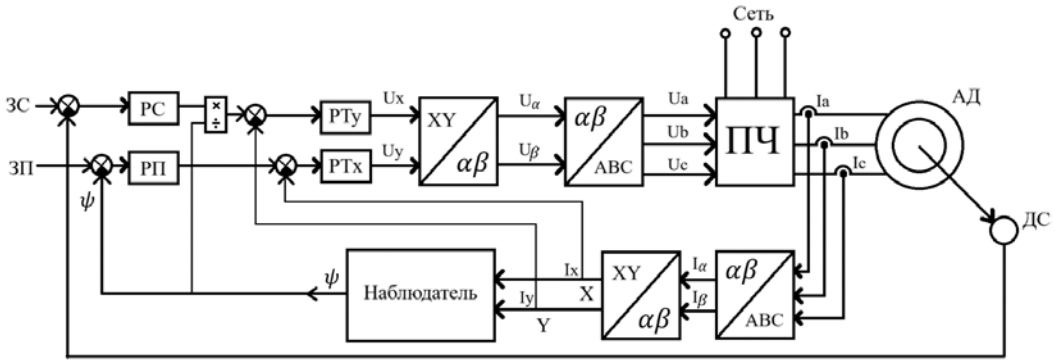


Рис. 4. Функциональная схема электропривода с векторным управлением асинхронным электродвигателем и датчиком скорости

Принцип управления скоростью вращения асинхронного двигателя заключается в формировании автономным инвертором синусоиды напряжения различной амплитуды и частоты. На основании рисунка 4 была разработана модель в приложении Matlab Simulink (рисунок 5).

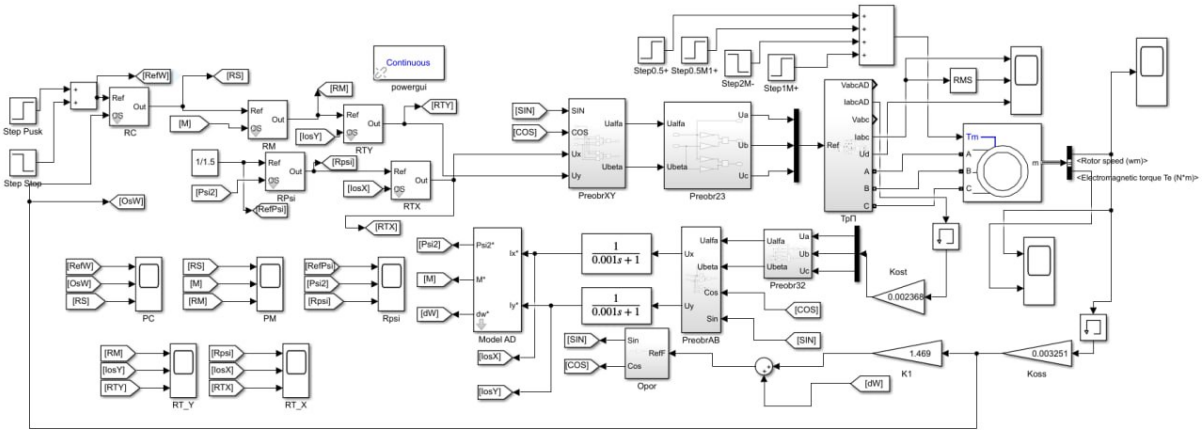


Рис. 5. Модель векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора на базе готовой модели асинхронного двигателя в Matlab Simulink

На рисунке 6 показаны осциллограммы скорости и электромагнитного момента при разгоне, торможении и номинальной работы двигателя.

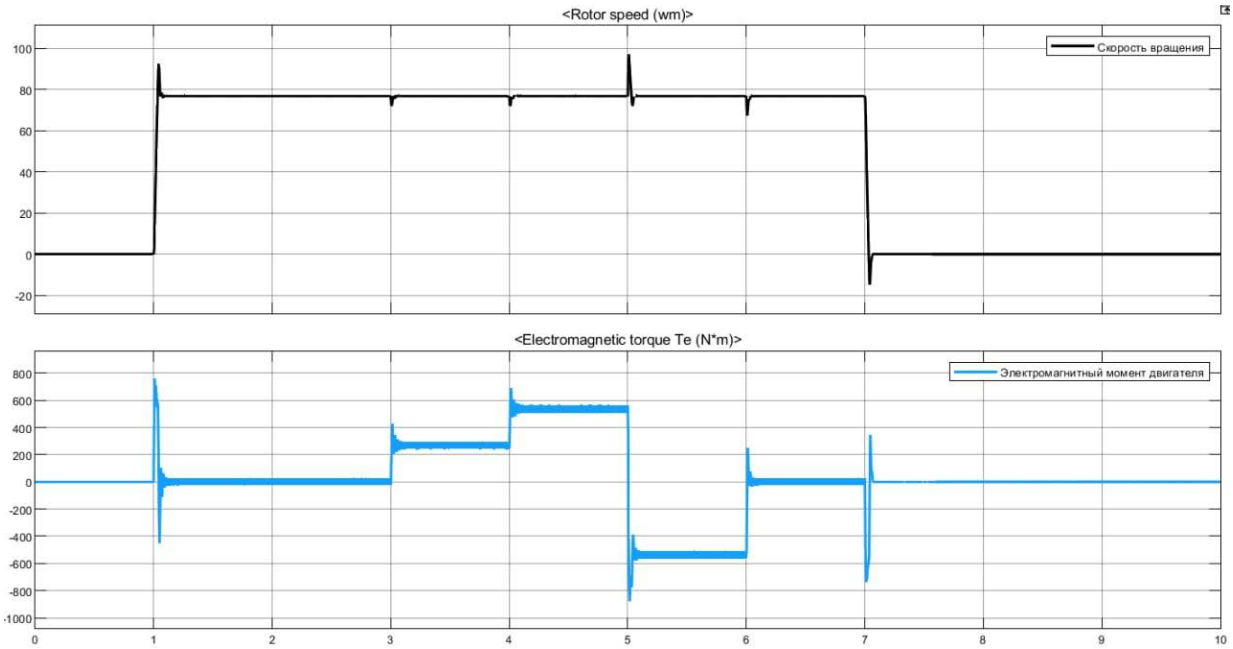


Рис. 6. Переходный процесс скорости и момента для модели векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора на базе готовой модели асинхронного двигателя в Matlab Simulink

На основе переходных процессов (рисунок 3 и 6), получены следующие результаты качественных показателей (таблица 3).

Таблица 3

Анализ параметров

Параметр	Модель векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора в виде передаточных функций	Модель векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора на базе готовой модели асинхронного двигателя
Время регулирования, с	1,28	1,06
Перерегулирование по скорости, %	7,03	8,64

– сигнал на выходе регулятора скорости соответствует развиваемому моменту двигателя – динамическому при пуске и торможении и статическому при нагружении двигателя;

– точное поддержание величин внутренних контуров, а именно – тока по осям X, Y, потокосцепления ротора и электромагнитного момента объясняется тем, что регуляторы внутренних контуров не входят в насыщение;

– при пуске двигателя, ток плавно нарастает, а в установившемся режиме величина тока пропорциональна нагрузочному моменту, В тормозных режимах ток потребления отсутствует.

Заключение. В результате проведённого анализа можно заключить, что модель векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора на базе готовой модели асинхронного двигателя обладает более высоким быстродействием, что объясняется меньшим временем инерционности используемых в ней элементов преобразователя частоты и асинхронного двигателя при практически равном перерегулировании, которое зависит напрямую от настройки параметров регулятора скорости, которое проводилось одинакового для каждой из моделей. При этом модель на базе готового асинхронного двигателя также имеет наблюдатель потокосцепления, который имеет в своём составе инерционное звено роторной цепи, позволяющее проводить вычисление величину потокосцепления без необходимости использования датчиков Холла.

Список источников

1.Фираго Б.И., Палячик Л.Б. Теория электропривода. Минск: Техноперспектива, 2007. 2-е изд. 585 с.

2.Онищенко. Г.Б. Теория электропривода. Москва: ИНФРА-М, 2017. 294 с.

3.Фираго Б.И. К вопросу векторного управления асинхронными двигателями / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 5. С. 5-16.

4.Анучин А.С. Системы управления электроприводов. Учебник для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.

5.Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.

6.Калачев Ю.Н., Самохвалов Д.В. Основы регулируемого электропривода (Антиучебник), 2023. 234 с.

7.Цуканов А.В., Лицин К.В. Разработка автоматизированной системы управления электроприводом барабана моталки // Металлург. 2024. № 1. С. 95-99.

8.Белодурин А.Д., Харлашкин К.Е., Гартлиб Е.А., Лицин К.В. Анализ системы автоматического управления на основе линейных регуляторов и mpc-регуляторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 377-381.

9.Кувшинов А.А., Греков Э.Л. Теория электропривода. Москва: БИБКОМ, 2009. 197 с.

10. Греков Э.Л., Безгин А.С. Имитационное моделирование частотно-регулируемых электроприводов. Оренбург: ОГУ, 2022. 139 с.
11. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии А4: Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

Лицин Константин Владимирович, канд. техн. наук, доцент, k.litsin@rambler.ru, Россия, Новотроицк, Новотроицкий филиал Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»,

Клименко Алексей Александрович, студент, Россия, Челябинск, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),

Ореховский Илья Андреевич, студент, orekhovsky.ilya@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Национальный исследовательский университет «ИТМО»

RESEARCH OF VECTOR CONTROL MODELS WITH ORIENTATION BY ROTOR FLUX LINKAGE

K.V. Litsin, A.A. Klimenko, I.A. Orekhovsky

There are currently several ways to control AC electric drives. Among them, the scalar control method and the vector control method with orientation along the rotor flux linkage stand out. Due to its advantages, namely higher accuracy and increased system dynamics, a vector control system is superior to a scalar one. There are several ways to build a vector control system model, and each has both advantages and disadvantages. Options for constructing a model of a vector control system based on rotor flux linkage in the form of transfer functions and based on a ready-made Matlab Simulink asynchronous motor model are presented. The structures of the developed models are analyzed. A description of the elements of the considered models is given and their construction is justified. An analysis of the qualitative indicators of the considered models was carried out.

Key words: induction motor, vector control, equivalent circuit, speed, control system.

Litsin Konstantin Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, k.litsin@rambler.ru, Russia, Novotroitsk, Novotroitsk branch of the National Research Technological University "MISIS",

Klimenko Alexey Alexandrovich, student, Russia, Chelyabinsk, South Ural State University (National Research University),

Orekhovsky Ilya Andreevich, student, orekhovsky.ilya@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, National Research University "ITMO"

УДК 681.5.015
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-542-543

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЙ

К.В. Гриценко, А.А. Жиленков

В современном мире автоматизированные системы играют ключевую роль в управлении технологическими процессами. Особое внимание уделяется системам управления движением манипуляторов параллельной структуры, так как они обеспечивают точность и эффективность процессов в промышленности. Однако, для эффективной работы таких систем необходимо правильно идентифицировать и настроить их параметры, особенно в условиях ограничений, например, при работе в ограниченном пространстве или при ограничениях на максимальную скорость или ускорение. В данной статье проведено исследование методов идентификации параметров автоматизированных систем управления движением манипуляторов параллельной структуры в условиях ограничений. Таким образом, данная статья вносит вклад в развитие науки и техники в области автоматизированных систем управления и поможет специалистам и исследователям создавать более эффективные и надежные системы управления для технологических процессов.

Ключевые слова: манипулятор с 3 степенями свободы, автоматизированные системы управления, идентификация параметров, сингулярные области, технологические процессы.

Введение. Современные промышленные процессы все чаще требуют автоматизации и улучшения производственных операций с применением роботизированных систем управления. Одной из ключевых задач в этой области является разработка эффективных алгоритмов управления для манипуляторов параллельной структуры, способных работать в условиях ограничений пространства и времени. Для этого необходимо провести идентификацию всех параметров таких систем, чтобы обеспечить их оптимальное функционирование и минимизировать вероятность ошибок. Идентификация параметров автоматизированных систем управления технологическими процессами для управления движением манипуляторов параллельной структуры является сложным и многоэтапным процессом, требующим комплексного подхода и использования специализированных методов и технологий. Для достижения эффективных результатов при идентификации параметров автоматизированных систем управления применяются различные алгоритмы и методы математического моделирования, такие как метод наименьших квадратов, метод подбора, метод ошибок, методы оптимизации и др. Эти методы позволяют провести анализ и оценку динамических ха-

рактеристик системы, определить ее стабильность и способность к управлению в условиях ограничений. Одним из ключевых аспектов идентификации параметров автоматизированных систем является сбор и анализ данных, полученных в процессе экспериментов и тестирования. Точность и достоверность полученных данных имеет решающее значение для точности и надежности результата. Поэтому необходимо проводить тщательную обработку информации и использовать специализированные программные средства для анализа и интерпретации данных. Правильный подход к идентификации параметров позволяет повысить эффективность работы системы, обеспечить ее надежность и точность управления, что в конечном итоге способствует улучшению производственных процессов и повышению конкурентоспособности предприятия [1].

Постановка задачи. Управление манипуляторами параллельной структуры сопряжено со значительными трудностями, связанными с необходимостью учета ограничений в их движении. Эти ограничения могут быть вызваны геометрией рабочего пространства, характеристиками двигателей и других компонентов системы. В таких условиях важным шагом в разработке и настройке автоматизированных систем управления является идентификация параметров, определяющих динамическое поведение манипуляторов. Процесс идентификации параметров автоматизированных систем управления технологическими процессами можно разделить на несколько этапов:

1. Моделирование рабочего пространства: Определение и моделирование рабочих зон манипуляторов параллельной структуры. Это включает в себя геометрический анализ и создание математических моделей, описывающих граничные условия и допустимые траектории движения [2].

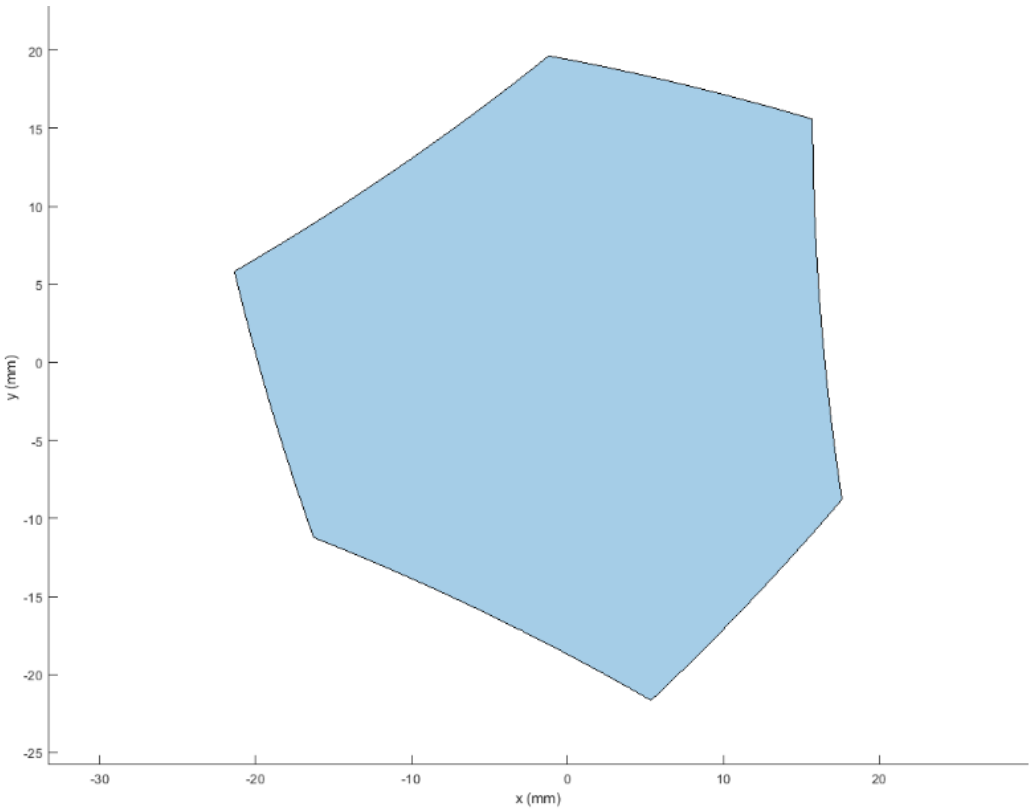


Рис. 1. Рабочее пространство манипулятора при расчете сингулярностей

Расчет якобиана для определения конфигурационного пространства манипулятора

2. Сбор данных и предобработка: Использование датчиков и систем сбора данных для получения информации о реальных траекториях и характеристиках движения манипуляторов. Предобработка включает фильтрацию данных и устранение шумов.

3. Идентификация параметров: Применение методов машинного обучения, таких как регрессионный анализ, алгоритмы оптимизации и нейронные сети для определения неизвестных параметров системы. На данном этапе осуществляется калибровка моделей с учетом ограничений рабочего пространства и динамических характеристик манипуляторов.

4. Верификация и валидация: Проверка точности полученных моделей и параметров с использованием тестовых данных. Валидация включает проведение экспериментов и сравнительный анализ с реальными данными для подтверждения корректности идентификации. Процесс идентификации параметров сталкивается с рядом ограничений:

- геометрические ограничения: включают в себя ограничения рабочего пространства, обусловленные конструктивными особенностями манипуляторов; расчет якобиана для определения конфигурационного пространства манипулятора [3].

- динамические ограничения: связаны с максимальной скоростью и ускорением манипуляторов, а также их инерционными характеристиками.

- технологические ограничения: включают надежность и отказоустойчивость компонентов системы [4].

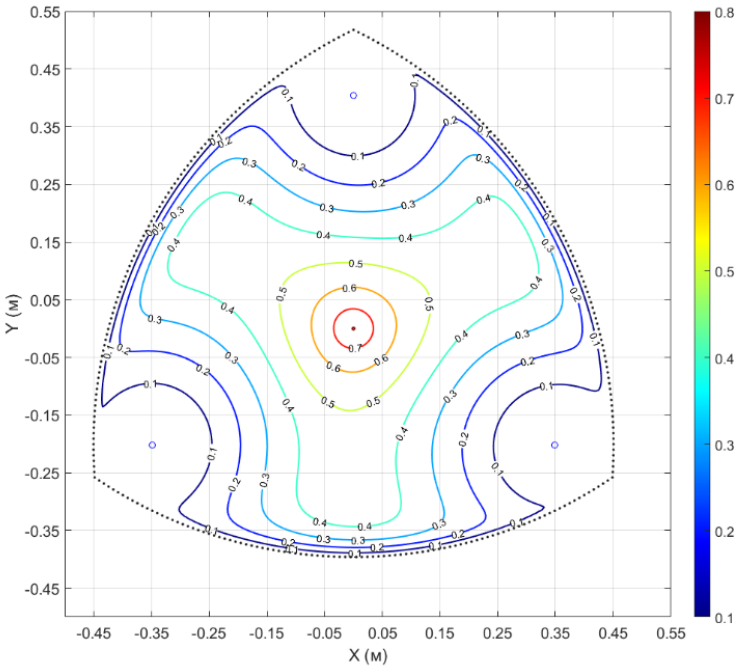


Рис. 2. Рабочее пространство манипулятора с сингулярными областями

Существует несколько подходов к идентификации параметров манипуляторов параллельной структуры:

- кинематическое моделирование: Использование математических моделей для описания движения манипулятора и поиска параметров, которые минимизируют отклонения от заданной траектории.
- экспериментальная идентификация: Анализ данных, полученных в ходе экспериментов, для определения неизвестных параметров.
- методы оптимизации: Применение алгоритмов оптимизации для поиска значений параметров, которые максимально удовлетворяют целевым функциям системы.
- комбинированные методы: Сочетание различных подходов для повышения точности и надежности идентификации.

Идентификация параметров автоматизированных систем управления позволяет значительно повысить эффективность и контроль технологических процессов. Например, в промышленной робототехнике это способствует улучшению качества продукции и снижению затрат на обслуживание оборудования.

Однако, процедуры идентификации могут сталкиваться с рядом ограничений, таких как:

- неопределенность и вариации параметров: Изменения в параметрах из-за износа или внешних факторов, которые трудно заранее учитывать.
- сложности моделирования: Высокая сложность математических моделей, особенно для многозвенных манипуляторов.
- высокие вычислительные затраты: Необходимость значительных ресурсов для проведения точной идентификации.

Рассмотрим идентификацию параметров при заявленных сингулярных конфигурациях в рабочем пространстве манипулятора для манипулятора типа 3-RRR. Перейдем к его математической модели. Опишем решение обратной задачи кинематики [5]:

$$\overline{OP} = \overline{OO_\iota} + \overline{O_\iota B_\iota} + \overline{B_\iota C_\iota} + \overline{C_\iota P} \quad (1)$$

Можно переписать уравнение (1) через следующие выражения:

$$x_p = b\cos\theta_i + c\cos\psi_i + a\cos(\phi + y_i) + x_{oi} \quad (2)$$

$$y_p = b\sin\theta_i + c\sin\psi_i + a\sin(\phi + y_i) + y_{oi} \quad (3)$$

$$c\cos\Psi = x_p - b\cos\theta_i - a\cos(\phi + y_i) - x_{oi} \quad (4)$$

$$c\sin\Psi = y_p - b\sin\theta_i - a\sin(\phi + y_i) - y_{oi} \quad (5)$$

где θ_i-матрица входных данных, ϕ – const – угол ориентации платформы, Ψ - $\angle x'$, P', B'; углы, отображающие положение точки P на подвижной платформе.

Сложив (4) и (5) выражение, необходимо переписать и привести к следующему виду:

$$e_{1i}\sin\theta_i + e_{2i}\cos\theta_i + e_{3i} = 0, \quad (6)$$

Для определения областей сингулярности используем неявную векторную функцию $v = [v_1, v_2, v_3]$, образованную трехмерной переменной $q = [x, y, \phi]$:

$$F(\theta, q) = 0 \quad (7)$$

Дифференцируя эту зависимость от времени, была получена формула между входной и выходной скоростями [6]:

$$Jq \cdot \dot{q} + J\theta \cdot \dot{\theta} = 0\,. \quad (8)$$

Две матрицы Якобиана Jq и Jθ изображают два типа сингулярностей: матрица Jq - связанная со вторым типом сингулярности внутри рабочего пространства, и матрица Jθ , относящейся к первому типу, представляющей, определяющие форму рабочего пространства. Для определения сингулярных конфигураций рабочего пространства матрица Якобиана Jq будет выражаться следующей формулой из математики:

$$\begin{pmatrix} \frac{dF_1}{dx} & \frac{dF_1}{dy} & \frac{dF_1}{d\,\phi} \\ \frac{dF_2}{dx} & \frac{dF_2}{dy} & \frac{dF_2}{d\,\phi} \\ \frac{dF_3}{dx} & \frac{dF_3}{dy} & \frac{dF_3}{d\,\phi} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Выполняя вычисления, можно записать ΔJq, детерминант матрицы Якобиана. Принимая ΔJq = 0, то в данном случае проявляются сингулярности данного типа манипулятора. Идея данной работы основана на том, что для данного манипулятора - каждая точка рабочего пространства может быть задействована только одним способом, т.е. заданный q = [x, y,φ] подразумевает только один вариант конфигурации θ = [θ1,θ2 ,θ3].

Заключение. Идентификация параметров автоматизированных систем управления технологическими процессами является комплексным и многогранным процессом. Она включает в себя несколько ключевых этапов, начиная от сбора данных и заканчивая валидацией модели. Использование манипуляторов параллельной структуры добавляет свои специфические аспекты и требования к этому процессу. Учет различных ограничений позволяет повысить точность и надежность модели, что, в свою очередь, способствует эффективному и безопасному управлению производственными операциями.

Точность и качество идентификации параметров имеют прямое влияние на эффективность работы АСУ, что подчеркивает важность данного процесса в современной промышленной практике.

Список литературы

1. Воробьева Н.С. Синтез программных перемещений и алгоритмов систем управления реконфигурируемых манипуляторов параллельно-последовательной структуры: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: 2.5.4 - Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, 2022 -473 с.
2. Ганиев Р.Ф. Манипуляционные механизмы параллельной структуры и их приложения в современной технике / Р. Ф. Ганиев, В. А. Глазунов // Доклады Академии наук. 2014. Т. 459, № 4. С. 428.
3. Эрастова К.Г., Ларюшкин П.А. Исследование рабочей зоны и особых положений плоского 3-RPR манипулятора в среде MATLAB // Инженерный вестник. 2016. № 7. С. 1–7.
4. Глазунов В.А., Серков Н.А., Орлов А.В., Алешин А.К., Рашоян Г.В., Скворцов С.А., Шалюхин К.А. Прецизионный механизм параллельной структуры для микроперемещений объектов в нанодиапазоне // VI международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». 2019. С. 125–127.
5. Алешин А.К., Антонов А.В., Борисов В.А. [и др.]. Механизмы перспективных робототехнических систем. под ред. В. А. Глазунова, С. В. Хейло. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. 296 с
6. Merlet J.-P. Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots // Journal of Mechanical Design. 2006. № 1 (128). P. 199–205.
7. Определение интергармоник тока асинхронного двигателя с переменной периодической нагрузкой / Б. А. Авдеев, С. Г. Черный, И. С. Моисеев, А. А. Жиленков // Электротехника. 2022. № 6. С. 39-44. DOI 10.53891/00135860_2022_6_39. EDN QJGBTW.
8. Жиленков А.А. Моделирование и применение киберфизического полигона для испытаний программно-аппаратных систем морского назначения / А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Морской вестник. 2022. № 4(84). С. 106-108. DOI 10.56192/18123694_2022_4_106. EDN UXVRDP.

Гриценко Кристина Вадимовна, старший преподаватель, kristya1808@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,

Жиленков Антон Александрович, декан, zhilenkovanton@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

IDENTIFICATION OF MOTION CONTROL PARAMETERS OF PARALLEL STRUCTURE MANIPULATORS UNDER CONSTRAINTS

K.V. Gritsenko, A.A. Zhilenkov

The modern world, automated systems play a key role in controlling technological processes. Special attention is given to motion control systems for parallel-structure manipulators, as they ensure accuracy and efficiency in industrial processes. However, for these systems to function effectively, it is necessary to properly identify and configure their parameters, particularly under constrained conditions, such as operating in limited space or with restrictions on maximum speed or acceleration. This article investigates methods for identifying parameters of automated motion control systems for parallel-structure manipulators under constraints. Thus, this article contributes to the advancement of science and technology in the field of automated control systems and will aid specialists and researchers in creating more efficient and reliable control systems for technological processes.

Key words: 3-RRR manipulator, singularity loci, automatic control systems, parameter identification, technological processes

Hritsenko Kristina Vadimovna, senior lecturer, kristya1808@mail.ru , Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State Maritime Technical University,

Zhilenkov Anton Alexandrovich, Dean, zhilenkovanton@gmail.com , Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State Maritime Technical University

УДК 681.518.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-546-547

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ WORD2VEC ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ УЯЗВИМОСТЕЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Э.И. Тихонов, Д.И. Опрышко

В статье рассматривается подход к тестированию на проникновение программного обеспечения (ПО) вычислительных систем и комплексов (ВСК) с использованием технологии Word2vec для выявления потенциальных уязвимостей программного обеспечения на основе спецификаций требований. Разработанный алгоритм обеспечивает получение наборов данных для формирования тестов на проникновение. Интеллектуальным ядром алгоритма является модель глубокого обучения Word2vec WordEmbeddings.

Ключевые слова: вычислительные системы и комплексы; технологии нейросетей; глубокое обучение; уязвимости программного обеспечения; тестирование на проникновение; обработка естественного языка.

Введение. Современные вычислительные системы и комплексы представляют собой совокупность взаимосвязанных между собой программных и аппаратных комплексов, непрерывное усложнение которых приводит к повышению требований к качеству и эффективности процессов тестирования, используемого в их составе программного обеспечения. Тестирование программного обеспечения является ресурсоемким процессом, важной частью которого является тестирование на проникновение.

Порядок и цели проведения тестирование на проникновение регламентируется рядом документов, в частности в Российской Федерации: ГОСТ Р 58143-2018 "Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Тестирование на проникновение", ведомственными документами (например – Положение Банка России от 17.04.2019 N 683-П, устанавливающее ежегодное тестирование для финансовых организаций (п. 3.2)); за рубежом – например, документами NIST (National Institute of Standards and Technology), OWASP (Open Web Application Security Project).

Основными целями и задачами тестирования на проникновение, исходя из анализа документов, следует считать:

– определение факта наличия уязвимостей в системе или сети;
– оценка эффективности мер безопасности;
– проверка соответствия системы требованиям безопасности;
– идентификация потенциальных угроз и рисков.

Целью исследований, в рамках которых разработан алгоритм, является повышения эффективности тестирования программного обеспечения ВСК посредством автоматизации процессов определение факта наличия уязвимостей программ и идентификация потенциальных угроз и рисков с использованием технологий машинного обучения. Для достижения указанной цели предлагается использовать одну из технологий обработки естественного языка (Natural language processing, NLP), подразумевающую применением алгоритмов машинного обучения для анализа текстовых данных – технологию Word2Vec. В качестве исходного набора текстовых данных предлагается использовать набор данных с описанием требований к программному обеспечению, по структуре аналогичный PROMISE_exp [1,2] и репозиторий CWE (описание уязвимостей) [3].

В настоящей статье предложен алгоритм, реализующий автоматическое извлечения признаков из документов, содержащих спецификацию требований к программному обеспечению (SRS или техническое задание на разработку (ТЗ)) с целью формирования суждений о базовой функциональности и общей архитектуре программного обеспечения и последующего определения класса программного обеспечения. Для определенного класса программного обеспечения в дальнейшем формируется перечень потенциальных уязвимостей с использованием данных репозитория Common Weakness Enumeration (CWE), на основе которого формируется перечень тестовых воздействий для тестирования на проникновение.

Формирование набора данных для тестирования на проникновение. В области NLP под понятием «word embedding» (встраивание слова, вложение слова, эмбеддинг) подразумевается представление слова в цифровом формате, удобном для обработки средствами языкового моделирования и формирования множеств признаков для применения методов глубокого обучения. Цель эмбеддинга – представление слов или фраз текстового корпуса в виде векторов (семантические вектора) в едином векторном пространстве. Смысл слова или фразы в данном пространстве будет определяться не набором закодированных в векторе букв, а векторным окружением.

Необходимая базовая терминология:

токен – текстовая единица, слово, предложение и т.д.;

токенизация – разбиение текста на токены;

документ – это совокупность токенов, которые принадлежат одной смысловой единице (предложение, содержимое тэга и т.д);

текстовый корпус – совокупность всех документов для обработки;

нормализация – приведение слов одинакового смысла к одной морфологической форме (стемминг и лемматизация);

стемминг – процесс приведения слова к неизменяемой основе;

лемматизация – процесс приведения слова к начальной форме (необходим словарь);

стоп-слова – слова без информативного смысла (служебные слова, предлоги, частицы и союзы).

В настоящее время наибольшее применение получили 3 варианта векторного представления слов и фраз, применимых для использования в технологиях глубокого обучения:

1. Word2Vec – распределенное представление слов и их композиций [4,5].
2. GloVe – метод глобальных векторов для представления слов [6].
3. LexVec – матричная векторизация с использованием оконной и отрицательной выборки [7].

Перед применением каждого из указанных вариантов представления текстовый корпус необходимо под-

готовить, проведя его нормализацию и лемматизацию.

Для решения задачи практического применения технологий обработки естественного языка с целью формирования набора данных для тестирования на проникновения и разработки алгоритма необходимо выделить следующие вопросы исследований:

1. Анализ существующих подходов к автоматизации тестирования с целью выявления возможных угроз безопасности, их недостатки.
2. Что будет использоваться в качестве документов и текстового корпуса, в чем будет заключаться подготовка текстового корпуса.
3. Какой вариант представления текста в числовые тензоры будет использоваться.
4. Какой вариант векторного представления (мэппинга) текстового корпуса будет использоваться.
5. Обобщенная технология автоматизированного процесс классификации требований к ПО, функций и классов ПО.

Применение технологий глубокого обучения, и, в частности нейросетевых технологий для автоматизации процессов тестирования на проникновение, в настоящее время не является новым и признается перспективным направлением исследований [7,8]. Однако, известным подходам с использованием технологий глубокого обучения присущи свои недостатки. Например, в статье «Improving the Usability of Static Security Analysis» [7] предложен подход, в основе которого лежит теория использования алгоритмов статистического обучения для формирования предупреждений о проблемах безопасности в программном коде (warnings output). Исходными данными для алгоритмов обучения являются отзывы пользователей-экспертов (user feedback) и сообщения о проблемах (issues) в коде (на вебсервисах для хостинга IT-проектов (например – GitHub). Пользователь находит и классифицирует небольшой процент связей «фрагмент кода, библиотека» – проблема/уязвимость», а алгоритм машинного обучения находит в коде аналогичные связи и автоматически формирует сообщения о проблемах безопасности. В ходе практической отработки предлагаемого в статье подхода авторы отмечают, что существует ряд проблем в применении подобного алгоритма. Большинство проблем связаны с тем, что алгоритм ориентирован на использование знаний пользователей-экспертов, уровень квалификации которых в сфере безопасности различен. Поэтому результаты автоматизированного поиска проблем в коде программ не точны. Развитие подхода, в зарубежной литературе обозначенный как Static Application Security Testing (SAST, Статическое тестирование безопасности приложений), также является перспективным. Работы в данном направлении ведутся более 10 лет [9,10]. К недостаткам указанного подхода следует отнести привязку к определенному узкому классу программ, трудность формализации описания уязвимости для последующей обработки статическими анализаторами. Кроме того, существующие и наиболее широко используемые SAST-алгоритмы часто дают ненадежные результаты из-за ложноположительных результатов выявления уязвимостей, значительно превышающих число истинно-положительных результатов.

Целесообразность применения методов глубокого обучения, связанных с NLP, отмечается рядом авторов. Например, в статье [5] указана возможность применения GloVe для минимизации проблемы ложных положительных результатов путем внедрения метода фильтрации результатов SAST. Применение NLP для определение факта наличия уязвимостей посредством выделения и анализа набора функциональных и нефункциональных требований к ПО с использованием нейросетевых моделей рассматривается, в частности, в статье [11]. В указанных выше исследованиях в качестве источника данных используются, как правило, исходные тексты программ. В рамках предлагаемого алгоритма в качестве источника данных для обучения нейросети используется текстовый корпус на основе формальных спецификаций требований к проекту (SRS) или технического задания на разработку ПО ВСК.

В рамках второго вопроса исследований предлагается использовать в качестве источника данных для обучения нейросети текстовый корпус на основе формальных спецификаций требований к проекту (SRS) или технического задания на разработку ПО ВСК. SRS – это перечисление функциональных и нефункциональных требований к программному обеспечению. Разработка SRS – в настоящее время за рубежом один из первых этапов жизненного цикла безопасной разработки ПО (SDLC).

В рамках алгоритма документ – совокупность документации, образующей техническое задание на разработку ПО и спецификация требований к проекту конкретной ВСК. Тестовый корпус – репозиторий доступных для обработки технических заданий и спецификаций. Организация данных «документ-текстовый корпус» необходима для обеспечения возможности использования различных способов представления текста в числовые тензоры (векторизации), рассмотренных далее.

В рамках третьего вопроса исследований необходимо выбрать способ векторизации текста. К числу применяемых в настоящее время способов относятся:

- прямое кодирование (one-hot encoding);
- мешок слов (bag of words, BoW);
- TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency – частотность слова в документе и инверсия частоты документа);
- методы группы «word embeddings».

В источниках [2], [11] смотрены классификаторы с использованием алгоритмов MNB (метод «наивного Байеса»), kNN (метод k ближайших соседей), SVM (метод опорных векторов), сетей RNN, LTSM на основе представлений расширенного набора данных с использованием технологий BoW и TF-IDF, указаны их недостатки.

В рамках четвертого вопроса исследований, с целью нивелировать эти недостатки, предлагается использовать метод группы «word embeddings» – Word2Vec для классификации требований и классов ПО ВСК.

С целью проведения исследований было разработана обобщенная технология автоматизированного процесса классификации требований к ПО, функций и классов ПО, представленная на рисунке 1. Технология позволяет оценивать преимущества и недостатки различных вариантов извлечения, выбора, фильтрации признаков для обучения модели Word Embedding Model, формировать классы требований к ПО и классы ПО ВСК.

Нормализация текстового корпуса заключается в удалении лингвистического контента, не несущего полезной информации. Извлечение признаков – извлечения числовых характеристик слов из текста. Выходные признаки соответствуют уникальным терминам в корпусе документа, а числовым значением каждого признака для документа является количество вхождений термина в анализируемом документе для извлечения признаков могут использоваться методы Bag of Words, возможно в комбинации с методами SVN, kNN и т.д.

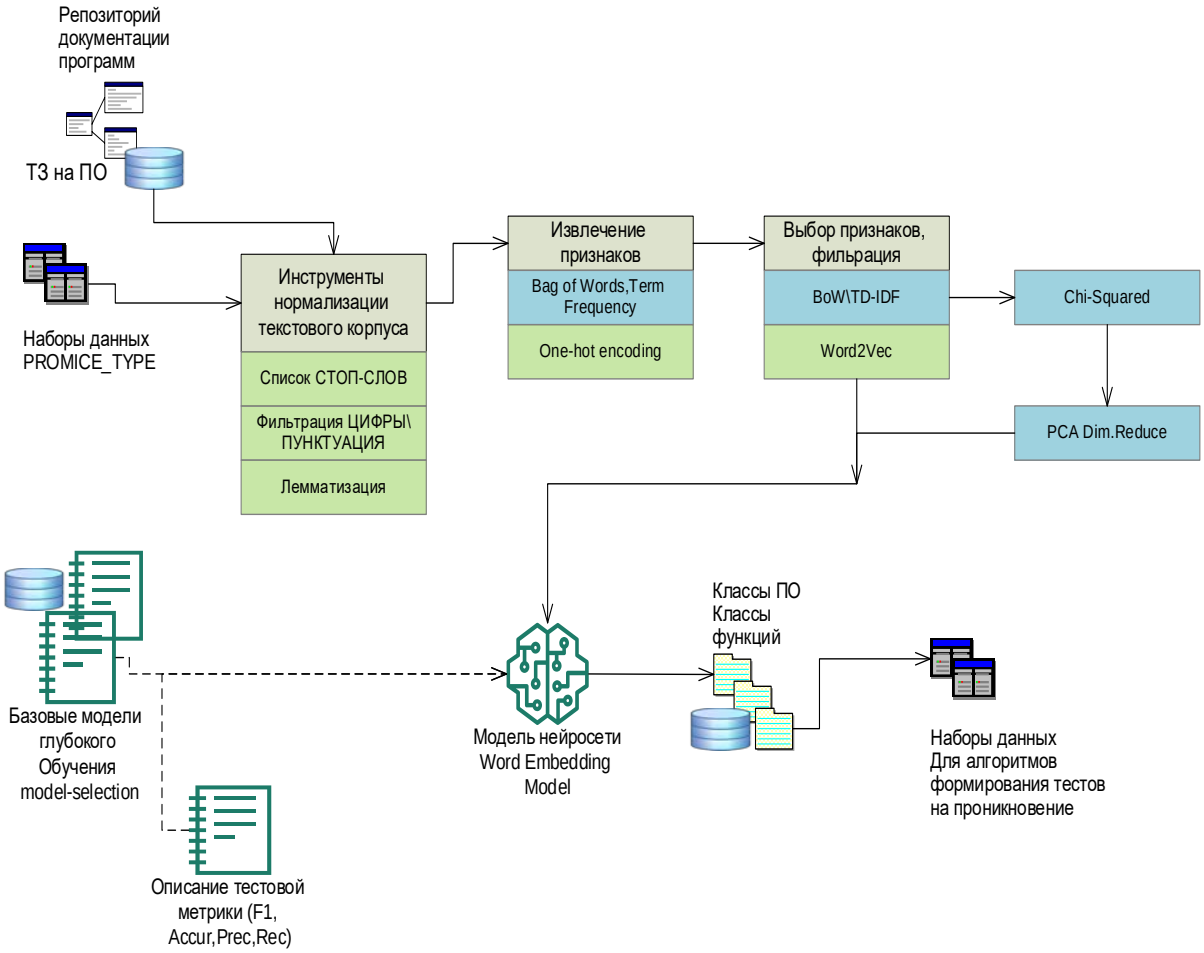


Рис. 1. Автоматизированный процесс классификации требований к ПО ВСК, функций и классов ПО ВСК

Цель фильтрации признаков является уменьшение размерности набора данных посредством отсеивания не значимых или редко встречающихся слов (терминов). Общепринятый подход в области обработки текстов к уменьшению размерности – применение метода хи-квадрат (Chi-Squred) для первоначального отбрасывания незначимых слов (критерий хи-квадрат – любая статистическая проверка гипотезы). Поскольку уменьшение размерности не имеет смысла для представления Word2vec, метод применяются только при использовании методов BoW и TD-IDF.

Алгоритм применения технологии Word2Vec для автоматизации процесса тестирования на проникновение. Структура алгоритма определяется использованием его в рамках технологии, представленной на рисунке 1, алгоритм является частным случаем указанной технологии и рассматривается ниже. На этапе формализации и извлечения признаков используется прямое кодирование, применение которого совместно с Word2Vec не вызывает практических трудностей. Для выбора, анализа, фильтрации признаков используется технология Word2Vec. Применение технологии Word2Vec как правило подразумевает использование двух типов моделей – CBOW и Skip-gram. Модель CBOW (Continuous Bag of Words) используется для обработки массива слов (контекста). На вход модели подается контекст (множество слов), а модель предсказывает слово, наиболее подходящее контексту. Модель Skip-gram применяется для решения задач генерации контекстных слов на базе одного входного слова. Задача, поставленная в статье, подразумевает сужение контекста текстового корпуса, поэтому в рамках алгоритма предлагается использовать модель CBOW. Модель представляет собой вариант реализации структуры языковой модели нейронной сети с прямой связью (feedforward NNLM) без нелинейного скрытого слоя, таким образом, слой проекции является общим для всех слов, векторы слов усредняются [5]. В упрощенном виде архитектура сети CBOW представлена на рисунке 2. W(t) – векторное представление слова из словаря размерностью V, t – индекс центрального слова контекста.

В статье [5] слой проекции описан только с функциональной точки зрения. Слой проекции отображает индексы дискретных слов контекста в непрерывное векторное пространство. Данный слой является общим для контекста, поэтому при практической реализации предлагается использовать топологию, приведенную на рисунке 3, позволяющую комбинировать матрицу весов нейронов и массив контекста в одномерный.

На входной слой нейросети подается контекстный набор слов – матрица V размерностью c×V, где c – вектор представления слова, V – размер контекста. Слой проекции не поддерживает функций активации, а обеспечивает формирование одномерного массива, результат перемножения матрицы весовых коэффициентов и входного контекстного набора (cV – continuous vector) – embedded word vectors для контекста.

Архитектура сети CBOW при практической реализации должна также содержать слой генерации вектора оценок (скрытый слой) и выходной слой, преобразующий оценки в вероятности, с функцией активации Softmax.

В качестве набора данных для обучения классификаторов требований к программному обеспечению (и на базе их – классификаторов типов программного обеспечения) используются следующие наборы данных:

1. Аналогичный по структуре PROMISE_exp набор данных, содержащий информацию о требования из ТЗ и классах требований. Классы требований представлены в таблице 1. По сравнению с PROMISE_exp количество классов сокращено, оставлены только классы, данные которых могут быть использованы для подбора воздействий для тестирования на проникновение из репозитория CWE

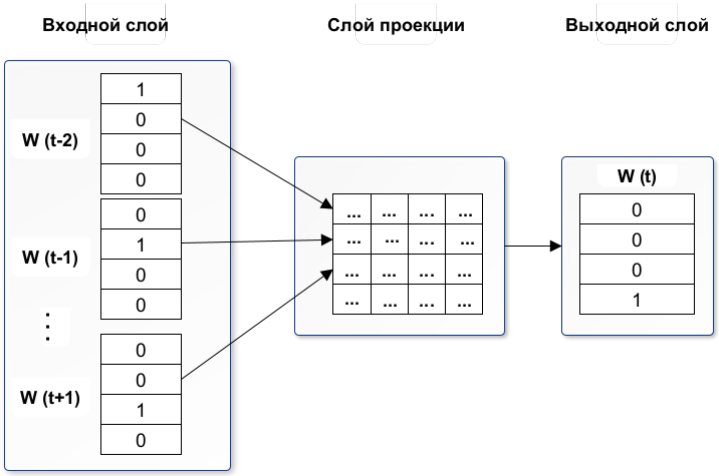


Рис. 2. Модель с архитектурой CBOW

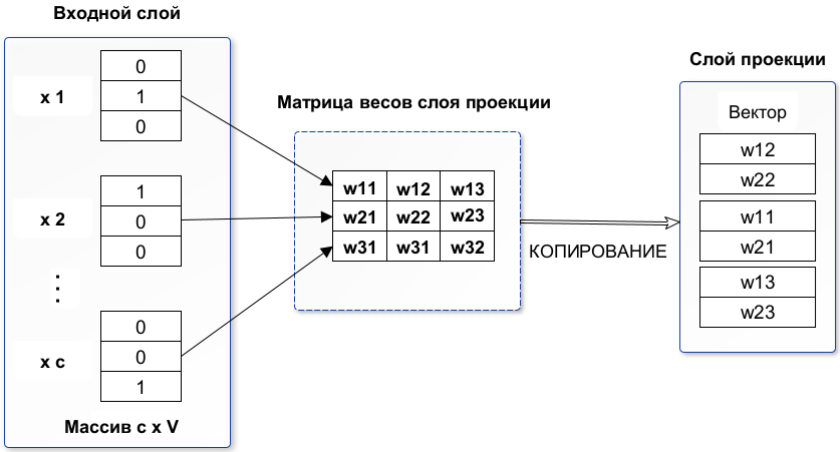


Рис. 3. Вариант формирования слоя проекции

Пример набора данных для обучения (датасета):

@ATTRIBUTE ProjectID
{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,45,46,47,48,49}

@ATTRIBUTE RequirementText string

@ATTRIBUTE _class_ {F,A,LF,MN,O,PE,SC,SE,US,FT,PO}%Check and make sure that FT and PO should be there

@DATA

1,'Система обновляет информацию на дисплее каждые 50 сек.',PE

1,'Цветовая гамма приложения должна соответствовать стандартам компании',LF

1,'Должна быть предусмотрена возможность экспорта и импорта данных прогноза',US

2,'Пользователь должен иметь возможность генерации отчета по безопасности за заданный период,F

2,'Должна быть предусмотрена возможность дистанционного подключения и аутентификации по протоколу SSH',SE

3,'Восстановление данных из резервной базы PostgreSQL должно занимать не более 10 часов',FT

3,'Должна быть предусмотрена работа с сетевым хранилищем данных по протоколы FTP',F

Таблица 1

Классы требований

Тип требований	Интерпретация требований применительно к ТЗ или SRS
Functional Requirement (F)	Функциональные требования
Availability (A)	Доступность – гарантия того, что ИТ-инфраструктура предприятия имеет достаточно возможностей восстановления и защиты от системных сбоев, стихийных бедствий или злонамеренных атак.

Look-and-feel (LF)	Группа требований по внешнему виду графического пользовательского интерфейса, аспекты дизайна (цвета, формы, макеты и шрифты), а также требования к поведению динамических элементов, таких как кнопки, поля и меню
Maintainability (MN)	Ремонтопригодность (восстанавливаемость ПО) – мера вероятности того, что программное изделие будет поддерживаться или восстанавливаться до заданной функции в течение определенного периода времени при заданном уровне условий восстановления на предприятии.
Operability (O)	Работоспособность применительно к программной инженерии – операционные требования, предъявляемые разработчиком чтобы гарантировать, что программное обеспечение сохранит полную функциональность в описываемом программном и аппаратном окружении.
Performance (PE)	В контексте программного обеспечения «производительность» – показатель того, насколько хорошо программная система или приложение выполняет задачи в рамках определенных ограничений, таких как скорость, оперативность, пропускная способность, масштабируемость и использование ресурсов.
Scalability (SC)	Масштабируемость программного обеспечения – мера того, насколько легко увеличить или уменьшить количество функциональных элементов программного обеспечения. Термин допустимо интерпретировать как способность программного обеспечения справляться с возросшими рабочими нагрузками при добавлении и удалении пользователей с минимальными затратами.
Security (SE)	Безопасность программного обеспечения – это концепция реализации механизмов построения безопасности, обеспечивающая возможность ПО оставаться функциональным (или устойчивым) к атакам. Степень выполнения требований по безопасности устанавливается после тестирования безопасности
Usability (US)	Юзабилити – показатель, позволяющий формализовать и измерить степень удобства использования программного продукта. С точки зрения дизайна это концепция, призванная обеспечить максимально простое и понятное использование продукции.
Fault Tolerance (FT)	Отказоустойчивость – способность системы (компьютера, сети, облачного кластера и т. д.) продолжать работу без перебоев при выходе из строя одного или нескольких компонентов.
Portability (PO)	Переносимость программного обеспечения – возможность использовать одно и то же программное обеспечение в разных средах. Переносимым является программное обеспечение, которое доступно для двух или более разных платформ или может быть перекомпилировано для них.

2. Текстовая база CWE [3], в которой классифицированы и кратко описаны отдельные уязвимости классов программного обеспечения и распространенных библиотек в соответствии с их функциональным назначением, а также риски при применении отдельных категорий ПО и библиотек, способы обнаружения уязвимостей и т.д.

Пример описания:

<Weakness ID="1004" Name="Sensitive Cookie Without 'HttpOnly' Flag" Abstraction="Variant" Structure="Simple" Status="Incomplete">

<Description>The product uses a cookie to store sensitive information, but the cookie is not marked with the HttpOnly flag.</Description>

<Extended_Description>The HttpOnly flag directs compatible browsers to prevent client-side script from accessing cookies. Including the HttpOnly flag in the Set-Cookie HTTP response header helps mitigate the risk associated with Cross-Site Scripting (XSS) where an attacker's script code might attempt to read the contents of a cookie and exfiltrate information obtained. When set, browsers that sup-port the flag will not reveal the contents of the cookie to a third party via client-side script executed via XSS.</Extended_Description>

<Detection_Methods>

<Detection_Method Detection_Method_ID="DM-14">

<Method>Automated Static Analysis</Method>

<Description>Automated static analysis, commonly referred to as Static Application Security Testing (SAST), can find some instances of this weakness by analyzing source code (or binary/compiled code) without having to execute it. Typically, this is done by building a model of data flow and control flow, then searching for potentially-vulnerable patterns that connect "sources" (origins of input) with "sinks" (destinations where the data interacts with external components, a lower layer such as the OS, etc.)</Description>

Подготовка текстового корпуса заключается в обработке полей Weakness ID, Description, Extended_Description для формирования единого текстового файла, связывающего понятия класс ПО ВСК, код уязвимости, протокол, библиотека и т.д.

С учетом вышеизложенного, предлагается схема алгоритма применения технологии Word2Vec для автоматизации процесса тестирования на проникновение посредством автоматизации формирования тестовых наборов, представленная на рисунке 4.

Получаемые в результате реализации рассмотренного алгоритма после обработки репозиториев PROMICE_TYPE и технических заданий (ТЗ, SRS) наборы данных для алгоритмов формирования тестов на проникновение представляют собой совокупность типов, функций, классов и требований к ПО. В результате обработки по аналогичной схеме текстовой базы CWE [3] формируется набор данных, содержащий типы, функции, классы, требования к ПО и соответствующие им уязвимости. В результате формируется набор данных, применимый для составления тестов или непосредственно, или путем использования алгоритмов машинного обучения (входные данные – классы и функции ПО, типы требований к ПО).

Математические операции предлагаемого алгоритма реализованы с использованием пакетов:

vec2graph – для визуализации семантической близости слов в виде сети на этапе первичного анализа текстового корпуса;

UDPipe или PyMystem3 – для лемматизации текстового корпуса;

Nltk – для токенизации, исключения стоп-слов;

Scikit-learn – при исследованиях с обработкой TF-IDF, при исследовании классификаторов;

Gensim – для работы с семантическими векторными моделями, реализации Word2Vec.

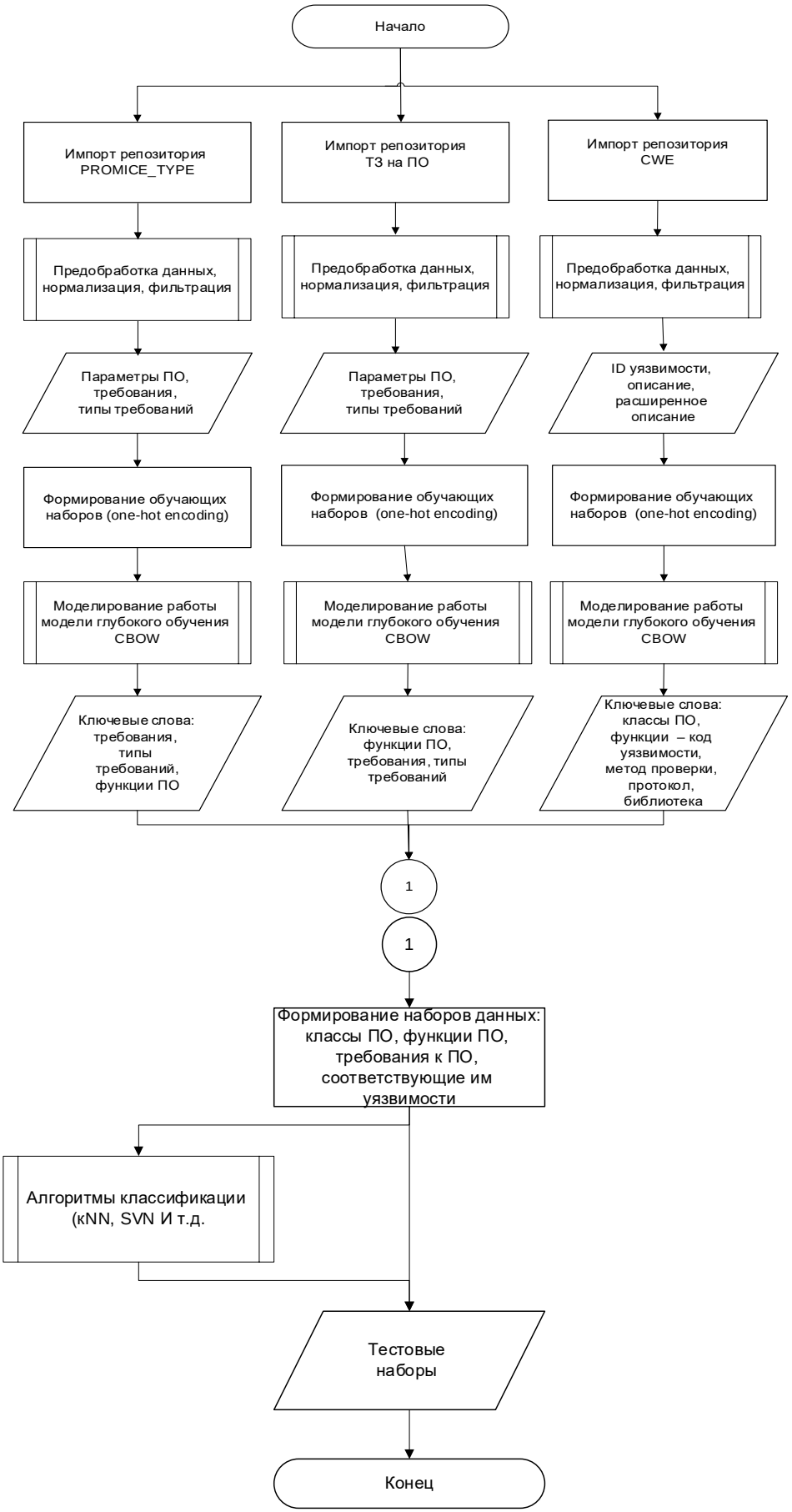


Рис. 4. Алгоритм формирования тестовых наборов с использованием технологии Word2Vec для обработки текстового корпуса

Заключение. Представленный алгоритм применения Word2Vec, примененный для решения прикладной задачи автоматизации процесса тестирования на проникновение в части автоматизации подбора уязвимостей с привязкой к заданному классу программного обеспечения ВСК, как показывают проведенные исследования, обеспечивает повышение результативности и оперативности тестирования на проникновение по сравнению с существующими подходами. Основными вопросами дальнейших исследований, проводимых в направлении выбора механизма извлечения признаков из текстов документации ПО ВСК будут являться:

1. Оценивание размерности наборов данных, которые можно получить в результате вычисления представлений BoW и TF-IDF в нормализованном текстовом корпусе требований к программному обеспечению.
2. Сравнение распространенных методов машинного обучения в рамках предлагаемой в статье технологии (рисунок 1) по производительности при решении задачи классификации требований и классификации ПО на наборах данных по п.1 (предложенного в статье, kNN, SVN и т.д).
3. Разработка архитектур на основе базовых архитектур нейросетей (RNN, LSTM и т.д) для построения классификаторов типа «класс ПО – тип уязвимости» с учетом типов требований к ПО, классов функций ПО, классов ПО, т.к текущие результаты практических исследований показывают достаточно низкую точность классификации с применением как нейросетей, так и альтернативных алгоритмов машинного обучения.

Список литературы

1. Márcia Lima,Victor Valle, Estevão Costa, Fylype Lira, and Bruno Gadelha, "Software Engineering Repositories: Expanding the PROMISE Database", Proceedings of the XXXIII Brazilian Symposium on Software Engineering (SBES 2019), Association for Computing Machinery. P. 427–436. DOI: 10.1145/3350768.3350776.
2. Edna Dias Canedo. Software Requirements Classification Using Machine Learning Algorithms, Entropy 2020, 22, 1057. DOI: 10.3390/e22091057.
3. MITRE Corporation, "Common Weakness Enumeration," CWE. Available: https://cwe.mitre.org (дата обращения: 11.04.2024).
4. Tomas Mikolov, Ilya Sutskever, Kai Chen, “Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality” https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2013/file/9aa42b31882ec039965f3c4923ce901b-Paper.pdf (дата обращения:18.04.2024).
5. Tomas Mikolov, Kai Chen, “Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space”, http://arxiv.org/pdf/1301.3781 (дата обращения:27.05.2024).
6. Jeffrey Pennington, Richard Socher, Christopher D. Manning, “GloVe: Global Vectors for Word Representation”, https://nlp.stanford.edu/pubs/glove.pdf (дата обращения:18.04.2024).
7. Alexandre Salle, Aline Villavicencio, Marco Idiart, “Matrix Factorization us-ing Window Sampling and Negative Sampling for Improved Word Represen-tations”. https://aclanthology.org/P16-2068 (дата обращения:18.04.2024).
8. Tripp O., Guarnieri S., Pistoia M., Aravkin A. Improving the usability of static security analysis. In Proceedings of the 2014 ACM SIGSAC Confer-ence on Computer Communications Security. P. 762-774.
9. Fellder M., Agreiter, B., Zech, P. and Breu, R., 2011. A classification for model-based security testing. Advances in System Testing and Validation Lifecycle (VALID 2011). P. 109-114.
10. Livshits V.B., Lam M.S. August. Finding Security Vulnerabili-ties in Java Applications with Static Analysis. In USENIX Security Sympo-sium, 2005. Vol. 14. P. 18-18.
11. HTTP Response Splitting, https://owasp.org/www-community/attacks/HTTP_Response_Splitting (дата обращения:10.03.2024).
12. Md. Abdur Rahman, Md. Ariful Haque, Md. Nurul Ahad Tawhid, "Classi-fying non-functional requirements using RNN variants for quality software development", Proceedings of the 3rd ACM SIGSOFT International Workshop on Machine Learning Techniques for Software Quality Evaluation, MaLTeSQuE 2019. P. 25–30. DOI: 10.1145/3340482.3342745.

Тихонов Эдуард Игоревич, канд. техн. наук, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Опрышко Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

THE ALGORITHM FOR FORMING PENETRATION TESTS OF COMPUTER SYSTEMS AND SOFTWARE APPLICATIONS

E.I. Tikhonov, D.I. Opryshko

The article considers an approach to penetration testing of computer systems and software applications using Word2vec technology to identify potential software vulnerabilities based on requirement specifications. The developed algorithm provides data sets for generating penetration tests. The intelligent core of the algorithm is the Word2vec WordEmbeddings deep learning model.

Key words: computer systems; software; neural network technologies; deep learning; software vulnerabilities; penetration test; natural language processing.

Tikhonov Edward Igorevich, candidate of technical sciences, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Opryshko Dmitrii Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky

УДК 621; 681.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-553-554

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНИРОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Т.Э. Хаев, Б.А. Айдаров

Бетонирование является одной из ключевых операций в строительстве, определяющей прочность и долговечность сооружений. С развитием строительной отрасли и технологий, бетонирование претерпевает значительные изменения. Актуальны не только традиционные методы, но и новейшие разработки, направленные на повышение эффективности, улучшение качества и обеспечение устойчивости бетона. Благодаря своей универсальности и разнообразию применений, бетон остается основным строительным материалом в самых различных проектах – от жилых и коммерческих объектов до инфраструктурных сооружений, таких как мосты, дороги и тоннели. Однако с увеличением масштабов и сложности строительных проектов перед строительной отраслью ставятся новые вызовы, требующие переосмыслений традиционных подходов к бетонированию.

Ключевые слова: инновационные технологии, технологии бетонирования, современное строительство, совершенствование организационно-управленческих работ.

Актуальность инновационных технологий бетонирования в современном строительстве обусловлена несколькими ключевыми факторами:

1. Рост строительной отрасли. В последние десятилетия наблюдается значительный рост строительного сектора, вызванный урбанизацией, увеличением населения и экономическим ростом. Это создает постоянный спрос на качественные и надежные строительные материалы и технологии, включая бетон.

2. Требования к качеству и безопасности. Современные строительные объекты должны соответствовать строгим требованиям к качеству и безопасности. Инновационные технологии бетонирования позволяют улучшить прочностные характеристики бетона, его долговечность и устойчивость к внешним воздействиям, что непосредственно влияет на безопасность зданий и сооружений.

3. Экологические аспекты. В условиях глобальных изменений климата и необходимости устойчивого развития, экологические требования к строительству становятся все более актуальными. Использование экологически чистых технологий и материалов, таких как переработанные наполнители или самовосстанавливающийся бетон, способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду.

4. Энергоэффективность. В то время как ресурсы становятся ограниченными, необходимость в энергосберегающих технологиях и оптимизации процессов становится приоритетом. Инновационные методы бетонирования могут значительно снизить затраты на энергию и ресурсы, что является важным фактором в современном строительстве.

5. Автоматизация и цифровизация. Переход к цифровым технологиям и автоматизации в строительстве открывает новые возможности для повышения эффективности процессов, управления качеством и сокращения времени выполнения работ. Инновационные подходы к бетонированию в этом контексте становятся не только возможностью, но и необходимостью для поддержания конкурентоспособности на рынке.

6. Адаптация к изменяющимся требованиям. Новые результаты исследований, изменения в строительных нормах и стандартах требуют постоянного обновления знаний и практик в области бетонирования. Актуальные технологии позволяют быстро реагировать на эти изменения и эффективно внедрять новые решения.

В данной статье мы рассмотрим современные технологии бетонирования, их преимущества и возможности применения в строительстве:

1. Традиционные методы бетонирования. В этом разделе стоит описать основные традиционные техники бетонирования, такие как:

- Ручное бетонирование: применение ручного труда в сочетании с простыми инструментами. Характеризуется высокой гибкостью, однако требует значительных трудозатрат и времени.
- Механизированное бетонирование: использование специализированной техники, такой как бетононасосы и миксеры, для увеличения скорости выполнения работ [9].

2. Инновационные технологии бетонирования. Здесь мы можем рассмотреть новейшие методы, такие как:

- 3D-печать бетоном: применяемая для создания сложных архитектурных форм, эта технология позволяет значительно уменьшить время выполнения работ и сократить отходы.
- Бетон с измененной структурой: технологии, направленные на создание бетона с улучшенными свойствами, такими как самоочищающиеся или самовосстанавливающиеся смеси.
- Применение добавок: использование суперпластификаторов, замедлителей и ускорителей затвердевания для улучшения характеристики бетона.

3. Автоматизация процессов бетонирования. Современные технологии автоматизации, включая использование роботов и интеллектуальных систем, позволяют оптимизировать процессы бетонирования. Рассматривается возможность применения датчиков и систем мониторинга, обеспечивающих контроль за качеством и влажностью бетона на всех этапах.

4. Энергетическая эффективность и экология. Актуальность изучения технологий бетонирования также заключается в вопросах устойчивого развития. Рассмотрение использования экологически чистых материалов и методов, таких как переработка строительных отходов и замены части цемента на вторичные наполнители, способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду.

В условиях современного строительного рынка, где требования к качеству, эффективности и экологичности становятся все более строгими, тема инновационных технологий бетонирования приобретает особую важность. Бетонирование — это не просто процесс укладки материала; это комплекс мероприятий, которые определяют прочность, долговечность и безопасность конечного продукта. Учитывая текущие тенденции и вызовы, можно выделить несколько ключевых выводов, подтверждающих актуальность и значимость данного направления [18].

1. Улучшение качественных характеристик бетона: Современные технологии бетонирования, включая использование специализированных добавок и модифицированных смесей, позволяют добиться значительного улучшения физических и химических свойств бетона. Это повышает его прочность, устойчивость к воздействию агрессивной среды и морозостойкость, что критически важно для обеспечения долговечности строительных объектов [20].

2. Снижение экологического воздействия: В современных условиях устойчивого развития и повышения экологических стандартов, применение технологий, направленных на уменьшение выбросов CO2 и использование вторичных материалов, становится необходимостью. Инновационные подходы, такие как переработка бетона, применение экологически чистых наполнителей и самовосстанавливающихся материалов, заново определяют влияние строительной отрасли на окружающую среду и способствуют созданию более «зеленых» зданий.

3. Экономическая эффективность: В условиях жесткой конкуренции на строительном рынке оптимизация затрат на материалы и процессы становится критической. Инновационные технологии бетонирования, позволяющие уменьшить временные затраты на укладку и настройку, а также сократить срок службы материалов, делают проекты экономически более привлекательными. Это имеет решающее значение для повышенной рентабельности и успешности строительных компаний.

4. Автоматизация и цифровизация процессов: Внедрение автоматизированных систем управления и мониторинга в процесс бетонирования открывает возможности для тщательного контроля качества и минимизации рисков ошибок. На базе инновационных технологий появляются новые решения, такие как 3D-печать бетона, которые значительно облегчают процесс и позволяют реализовывать более сложные архитектурные идеи, сокращая трудозатраты.

5. Поддержание конкурентоспособности: Конкуренция на строительном рынке требует постоянного внедрения новых технологий и методов. Мастера и строительные компании, использующие современные подходы к бетонированию, оказываются в более выгодной позиции, поскольку могут предлагать своим заказчикам решения, отвечающие не только текущим, но и будущим требованиям.

В заключение, исследование инновационных технологий бетонирования является необходимым шагом к улучшению всех аспектов строительного процесса. Это включает качество материалов, эффективность работ, экономическую целесообразность и экологическую безопасность. В условиях быстрого развития строительной отрасли потребность в таких исследованиях будет только расти, и с каждым днем открываются новые горизонты для применения передовых решений в бетонировании, способствующих созданию устойчивой и безопасной среды для жизни людей.

Список литературы

1. Серова Р.Ф., Хаев Т.Э., Ткач Е.В. Изучение свойств гипсовых систем с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 80-85.

2. Хаев Т.Э., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Научно-технические предпосылки разработки облегчённых гипсовых систем с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // Научное обозрение. 2017. № 7. С. 28- 32.

3. Хаев Т.Э., Ткач Е.В., Орешкин Д.В. Модифицированный облегченный гипсовый материал с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ // Строительные материалы, 2017. № 10. С. 45-51.

4. Бидов Т.Х. Организационно-технологические и управленческие решения использования методов неразрушающего контроля при возведении монолитных конструкций // Научное обозрение, 2017. №13. С. 54-57.

5. Бидов. Т.Х. Аветисян. Р.Т. Формирование производственно-технологических модулей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №12. С. 496-498.

6. Бидов. Т.Х. Аветисян Р.Т. разработка организационно-технологической модели потенциала устройства временного крепления стенок выемок при производстве работ нулевого цикла // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №12. С. 427-431.

7. Лапидус А.А. Потенциал эффективности организационно-технологических решений строительного объекта // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 175-180.

8. Лапидус А.А., Бидов Т.Х. Формирование производственно-технологических модулей, обосновывающих использование методов неразрушающего контроля при возведении монолитных конструкций гражданских зданий // Наука и бизнес: пути развития. 2019. №1. С. 31-36.

9. Хаев Т.Э., Аветисян Р.Т. Факторы, влияющие на принятие организационно-технологических решений при выборе конструктивных методов креплений стенок выемок и котлованов // наука и бизнес: пути развития, 2019. С. 85-87.

10. Хубаев А.О. Описание эксперимента при расчете потенциала производства зимнего бетонирования // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2020. №2. С. 247-252.

11. Хубаев. А.О., Бидов Т.Х. Организационно-технологический потенциал использования методов неразрушающего контроля при производстве бетонных работ в зимний период // Наука и бизнес: пути развития, 2018. №4. С. 101-104.

12. Хубаев А.О. Бидов Т.Х. Организационно-технологический потенциал использования методов неразрушающего контроля при производстве бетонных работ в зимний период // Наука и бизнес: пути развития, 2018. С. 101-104.

13. Lapidus A., Bidov T., Khubaev A. The study of the calibration dependences used when testing the concrete strength by nondestructive methods // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 117. P 00094. DOI: 10.1051/matecconf/201711700094.

14. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Organizational and technological solutions justifying use of non-destructive methods of control when building monolithic constructions of civil buildings and structures // MATEC Web of Conferences. 2019. V. 251. P. 05014.

15. Lapidus A., Khubaev A., Bidov T. Development of a three-tier system of parameters in the formation of the organizational and technological potential of using non-destructive testing methods // E3S Web of Conferences. 2019. V. 97.

P. 06037. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706037.

16. Lapidus A., Kangezova M., Bidov T. Systematization of organizational and technological aspects of scientific technical support of buildings and constructions over 100m high // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 698. P. 022091.

17. Лапидус А.А., Фатуллаев Р.С. Оценка потенциала проведения внеплановых ремонтных работ многоквартирных жилых домов // Научное обозрение, 2017. С. 10–13.

18. Фатуллаев Р.С., Хаев Т.Э. Использование современных строительных материалов как фактор, влияющий на эффективность организационно-технологических решений при проведении капитального ремонта // Перспективы науки, 2019. №5. С. 224-228.

19. Казакова Н.Е. Повышение квалификации как фактор обеспечения компетентности персонала при строительстве телекоммуникационных объектов и сооружений связи // Вес качества, 2016. №2. С. 112-119.

20. Хаев Т.Э. Совершенствование системы организационно-управленческих решений при определении технического состояния несущих конструкций здания // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №2. С. 621-623.

Хаев Тотраз Эдуардович, канд. техн. наук, доцент, haevt@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Айдаров Борис Астанович, технический директор, astanovich2@mail.ru, Россия, Москва, ООО «Бидов Груп»

INNOVATIVE CONCRETING TECHNOLOGIES IN MODERN CONSTRUCTION

T.E. Khaev, B.A. Aydarov

Concreting is one of the key operations in construction, determining the strength and durability of structures. With the development of the construction industry and technology, concreting is undergoing significant changes. Not only traditional methods are relevant, but also the latest developments aimed at improving the efficiency, quality and sustainability of concrete. Due to its versatility and variety of applications, concrete remains the primary construction material in a wide variety of projects, from residential and commercial projects to infrastructure structures such as bridges, roads and tunnels. However, with the increasing scale and complexity of construction projects, the construction industry is facing new challenges that require rethinking traditional approaches to concreting.

Key words: innovative technologies, concreting technologies, modern construction, improvement of organizational and management works.

Khaev Totraz Eduardovich, candidate of technical sciences,docent, haevt@mail.ru, Russia, Moscow, National research Moscow state University of civil engineering,

Aydarov Boris Astanovich, technical director, astanovich2@mail.ru, Russia, Moscow, LLC «Bidov group»

УДК 681.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-555-556

ГОДОГРАФ ВЕКТОРА УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МНОГОМЕРНОЙ САУ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОННЫХ И КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

К.С. Галицков

Рассмотрены вопросы совершенствования управления электротехническим комплексом высокотехнологичным оборудованием производства бетонных и керамических материалов и изделий, обеспечивающих повышение надежности производства материалов и изделий заданной прочности (или плотности) в условиях снижения энергозатрат.

Ключевые слова: высокотехнологичное оборудование, электротехнический комплекс, управление, многомерные системы автоматического управления.

В строительстве широко используются бетонные и керамические материалы и изделия (БиКМИ) – железобетонные балки, перекрытия, изделия из ячеистого бетона, керамический кирпич, керамзит и т.п. Их основными характеристиками, по которым они и маркируются по ГОСТ, являются прочность R и плотность ρ. На производство БиКМИ расходуется значительное количество энергии. Это обусловлено не только энергозатратными технологиями добычи сырья, его обработки, приготовлением бетонной смеси или керамической смеси, последующего изготовления требуемых материалов и изделий, но и значительными потерями энергии из-за неэффективного управления этими технологическими процессами.

В качестве примера можно рассмотреть процессы виброуплотнения бетонной смеси в форме, обжиг керамзита во вращающейся печи, формование глиняной массы в шнековом вакуумном прессе при производстве керамического кирпича, эффективное выполнение которых, в условиях действия известных возмущений и ограничений, возможно лишь при оптимальном соотношении нескольких технологических параметров производственного оборудования.

Несмотря на известные исследования по нахождению рациональных способов и режимов выполнения процессов производства БиКМИ, тем не менее, традиционно практическая технология предусматривает реализацию простейших алгоритмов управления режимами работы оборудования, при которых для обеспечения надежности достижения задачи производства материалов и изделий заданной R (или ρ) используется далеко не рациональное сочетание технологических параметров, что сопровождается, как правило, снижением производительности и возрастанием энергозатрат. В связи с этим для решения актуальной задачи повышения эффективности изготовления БиКМИ считаем необходимым оснащение технологического оборудования дополнительными системами управления, с помощью которых возможна практическая реализация обеспечения оптимальных режимов выполнения сложных технологических процессов производства БиКМИ, т. е. внедрение наукоемких технологий производства БиКМИ. При этом рассматриваемое оборудование предприятий строительной индустрии становится высокотехнологичным, ориентированным на производство БиКМИ заданной R (или ρ) в условиях снижения энергозатрат. Цель настоящей публикации – формализация выбора элементов вектора управляющих воздействий многомерной системы автоматического управления (САУ) высокотехнологичного оборудования (ВТО) в соответствии с заданным R (или ρ).

В синтезе вектора $\overline{U_0}$ рационального управления ВТО производства БиКМИ заданной прочности R (или плотности ρ) можно выделить прямую и обратную задачи.

Прямая задача заключается в нахождении аналитических или экспериментальных зависимостей R (или ρ) от ограниченного множества Φ_1 факторов, влияющих на прочность (или плотность) БиКМИ:

$$R = F_1(\Phi_1),\ \rho = F_2(\Phi_1). \tag{1}$$

В множество Φ_1 могут входить и характеристики исходного сырья, и особенности выполнения технологических операций, и технические параметры электротехнического комплекса оборудования и прочие, т.е. и управляющие воздействия и возмущения, которые можно представить векторами $\overline{U}$ и $\overline{H}$, соответственно.

В работах [1-5] на основе анализа известных публикаций по технологии производства БиКМИ и с учетом особенностей конструкции исполнительных систем технологического оборудования, формирующий вектор $\overline{U}$ управляющих воздействий, выявлены зависимости (1) применительно:

– к обжигу керамзита во вращающейся печи

$$R_1 = F_3(\omega_{\text{вп}}, Q_{\text{г}}, q_{\text{п}}, w, \gamma), \tag{2}$$

где $\omega_{\text{вп}}$ – угловая скорость вращающейся печи, $Q_{\text{г}}$ – объемная тепловая мощность горелки, $q_{\text{п}}$ – производительность питателя, w – влажность загружаемого сырья, γ – обобщенная характеристика глины;

– к формированию керамической массы в шнековом вакуумном прессе при производстве кирпича

$$R_2 = F_4(P_{\text{в}}, \dot{\gamma}, w, \gamma), \tag{3}$$

где $P_{\text{в}}$ – разряжение в вакуум-камере пресса, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвиговых деформаций керамической массы в выходном сечении формующего звена;

– к виброуплотнению бетонной смеси в форме двухвальными дебалансными вибровозбудителями

$$R_3 = F_5[A(t), \omega(t), \gamma(t)], \tag{4}$$

где $A(t)$, $\omega(t)$, $\gamma(t)$ – зависимости изменения во времени амплитуды, частоты и направления колебаний возмущающей силы, которые определяются системой автоматического согласованного управления относительного углового положения синхронно вращающихся дебалансов вибровозбудителя.

Результаты прямой задачи позволяют определить ряд важных технологических характеристик. Так, например, выполняя исследования функций (3) в условиях известных ограничений как на характеристики исходного сырья, так и на параметры исполнительных систем оборудования, можно найти диапазон $Д_R$ изменения прочности R бетонных или керамических материалов и изделий:

$$Д_R = R_{max} / R_{min}\ , \tag{5}$$

где R_{max}, R_{min} – максимальное и минимальное достижимые значения прочности БиКМИ, которые можно получить, выполняя технологические процессы на рассматриваемом ВТО. Естественно, это относится и к плотности ρ, но для сокращения объема статьи дальше, кроме особых случаев, упоминать о плотности ρ не будем.

Кроме того, анализ функций (3) позволяет сформировать задачу автоматического конструирования технологического оборудования или отдельных его исполнительных систем. Например, для совершенствования виброуплотнения бетонной смеси в форме разработаны новые конструкции двухвальных дебалансных вибровозбудителей и систем автоматического управления их асинхронных электроприводов [5].

Применение в вакуумном шнековом прессе согласованного управления электроприводами шнека, вакуумного насоса, глиносмесителя и использование информации о скорости сдвиговых деформаций $\dot{\gamma}$ глиняной массы в формующем звене, позволяет целенаправленно изменять и стабилизировать характеристики сформованного сырца по критерию производства кирпича заданной прочности [6, 7].

Как показано в [8, 9] существенное расширение величины $Д_R$ при производстве керамзита заданной R (или ρ) может быть достигнуто, если кривую обжига керамзита формировать и автоматически поддерживать согласованным управлением электроприводами вращения печи, питателя и устройства управления подачи топлива в газовую горелку.

Решение прямой задачи представляет собой частный случай (главным образом, это статика) математической модели технологического процесса или установки объекта управления. По результатам выполнения прямой задачи в области управляемости выделяют k подобластей управляющих воздействий. При определении границ j-й подобласти ($j \in 1,\ldots,k$) учитывают допустимые (по техническим нормативам) вариации технологических параметров, в условиях которых можно обеспечить производство БиКМИ заданной марки M_j по прочности R (или плотности ρ).

Решение обратной задачи (которая, собственно, и заключается в построении годографа вектора $\overline{U}_0$ управляющих воздействий, являющегося функцией прочности R (или плотности ρ), и представляющего собой геометрическое место точек, которое описывает конец вектора $\overline{U}_0$ при изменении скаляра R (или ρ), когда начало $\overline{U}_0$ помещено в точку О n-мерного пространства $OU_1U_2,\ldots,U_n$) будем выполнять применительно к производству изделия заданной марки M_i по прочности (здесь $i \in 1,\ldots,k$, где k – количество разнообразных марок изделия, выпуск которых может быть осуществлен с использованием данного оборудования) в условиях минимальных энергозатрат и максимально достижимой производительности.

Допускаем, что предварительно, до решения обратной задачи осуществлен структурный синтез многомерной системы управления ЭТК ВТО и выполнена параметрическая оптимизация регуляторов сепаратных каналов системы [10-13]. Принимая во внимание, что в рассматриваемом классе объектов управления наблюдается существенная нестационарность параметров и учитывая требования, предъявляемые к исполнительным системам оборудования специфическими условиями выполнения технологических процессов, основными критериями синтеза сепаратных систем автоматического управления является обеспечение робастности, требуемого быстродействия и минимизации ошибки Δ_i управления (здесь $i \in 1,\ldots,n$, где n – число сепаратных САУ).

В пространстве вектора $\overline{U}$ выделим k областей управления, каждая из которых обеспечивает управление процессом для производства изделия марки M_i [14]. В качестве примера на рис. 1 показаны три области в одном из возможных сечений пространства $\overline{U}$ применительно к управлению приводами шнекового вакуумного пресса. Здесь управляющие воздействия – влажность w и скорость сдвиговых деформаций $\dot{\gamma}$ в каждой i-й области.

Анализируя особенности энергетических режимов работы исполнительных систем ВТО в каждой i-й области, находим точку E_i^*, соответствующую наиболее рациональному управлению $\overline{U}_0$ применительно к выбранному критерию. В приведенном примере точка E_i^* – это верхняя граница области M_i, где при минимально допустимой влажности w_{min} момент нагрузки $M_н$ на приводной двигатель шнека снижается, что уменьшает энергозатраты, а максимально допустимое значение скорости сдвиговых деформаций $\dot{\gamma}$ позволяет увеличить скорость формования и, тем самым, повысить производительность установки. Принимая во внимание, что исполнительные системы ВТО имеют ошибки Δ_i управления, рабочую точку E_{i0} выбираем в ε-окрестности от E_i^* (рис. 1), что гарантирует стабильно производство изделий марки M_i.

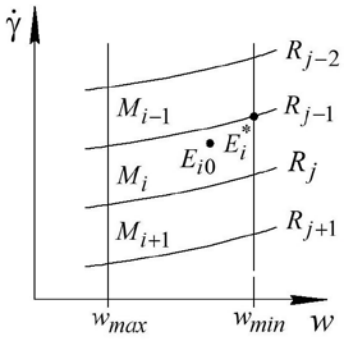


Рис. 1. Области марок керамического кирпича

Если найти точки E_{i0} во всех k областях и последовательно их соединить (например, по условию возрастания значения R), то получим в пространстве управления $OU_1U_2,\ldots,U_n$ годограф (рис. 2) вектора $\overline{U}_0(R)$ управляющих воздействий. Он находится в трубке допустимых отклонений, определяемых погрешностями Δ_i.

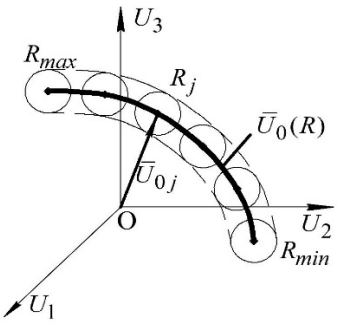


Рис. 2. Годограф вектора управляющих воздействий

Длина $\overline{U}_0(R)$ определяет диапазон $Д_R$. Практическое использование годографа позволяет выбрать рациональные режимы работы исполнительных систем ВТО при производстве изделий заданной марки по прочности.

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Разработана методика построения годографа $\overline{U}_0(R)$ вектора $\overline{U}_0$ рационального управления производством изделий в диапазоне $Д_R$ по прочности (или плотности) при минимальном расходе энергии в условиях максимально достижимой производительности.

2. Практическое использование годографа $\overline{U}_0(R)$ позволяет найти положение вектора $\overline{U}_{0j}(R_j)$ в пространстве управляющих воздействий и выбрать рациональные режимы работы исполнительных систем технологического оборудования при производстве изделий заданной прочности R_j.

Список литературы

1. Фадеев А.С., Галицков С.Я., Данилушкин А.И. Моделирование вспучивания керамзита во вращающейся печи как объекта управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2011. № 2(30). С. 160-168.

2. Моделирование обжига керамзита в печи с регулируемой скоростью вращения как объекта управления / К.С. Галицков, С.Я. Галицков, О.В. Самохвалов, А.С. Фадеев // Научное обозрение. 2015. №7. С. 227-237.

3. Галицков К.С., Галицков С.Я., Назаров М.А. Математическое моделирование формования керамической массы в шнековом прессе как объекта автоматизации производства кирпича // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №3. С. 25-29.

4. Галицков С.Я., Назаров М.А. Моделирование поля сдвиговых деформаций керамической массы в формующем звене шнекового пресса // Фундаментальные исследования. 2013. №8-1. С. 29-32.

5. Галицков С.Я. Галицков К.С., Баскаков А.В. Автоматизация уплотнения бетонной смеси в форме двухвальными вибровозбудителями. Самара: СамЛюксПринт, 2012. 218 с.

6. Galitskov S.Ya., Nazarov M.A., Galitskov K.S. Structure of Intelligent Control System of Auger Vacuum Extruder for Ceramic Bricks' Manufacturing // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10. № 20. Pp. 40846-40852.

7. Галицков К.С., Галицков С.Я., Назаров М.А. Задающее устройство и наблюдатель скорости сдвига керамической массы в формующем звене шнекового вакуумного пресса // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 27-30.

8. Galitskov S.Ya., Galitskov K.S., Samokhvalov O.V. Modelling Operating Area of Condition and Management of High Strength Bloating Clay, Stoving in a Rotary Kiln // Procedia Engineering. 2016. Т. 153. Pp. 609-612.

9. Галицков К.С., Самохвалов О.В. Отображение прочностных характеристик керамзита в пространстве температурных режимов трех опорных сечений печи // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 91-94.

10. Галицков С.Я., Самохвалов О.В., Фадеев А.С. Структурный синтез многокаонтурной системы автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи // Научное обозрение. 2013. № 12. С. 204-208.

11. Галицков К.С. Синтез интеллектуальных систем управления производством бетонных изделий и керамических материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 6. С. 59-63.

12. Галицков К.С. Методика выбора параметров регуляторов в многоконтурных системах с одной измеряемой координатой // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Самара: СГАСУ, 2010. С. 787-789.

13. Галицков С.Я., Назаров М.А. Структурный синтез интеллектуальной системы стабилизации прочности керамических камней на технологическом этапе их формования // Интерстроймех 2013: матер. междунар. научн.-техн. конф. Новочеркасск: ЮРГПУ, 2013. С. 33-34.

14. Галицков К.С. Многоконтурные системы с одной измеряемой координатой в управлении технологическими процессами производства бетонных и керамических материалов и изделий // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XVIII междунар. конф. Самара: СамГТУ, 2016. С. 360-364.

Галицков Константин Станиславович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, ksgal@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

HODOGRAPH OF VECTOR CONTROL INFLUENCES OF MULTI-DIMENSIONAL ACS FOR HIGH-TECH EQUIPMENT FOR CONCRETE PRODUCTION AND CERAMIC MATERIALS AND PRODUCTS

K.S. Galitskov

The issues of improving the management of the electrical complex of high-tech equipment for the production of concrete and ceramic materials and products are considered, ensuring increased reliability of the production of materials and products of a given strength (or density) in conditions of reducing energy costs.

Key words: high-tech equipment, electrical complex, control, multi-dimensional automatic control systems.

Galitskov Konstantin Stanislavovich, candidate of engineering sciences, docent, head of department, ksgal@yandex.ru, Russia, Samara, Samara state technical university

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 622.248.9
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-559-560

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ФРЕЗЕРНОЙ КОМПОНОВКИ

Д.А. Хакимов, Д.И. Чистов, Э.Ш. Имаева

В статье рассмотрен принцип повышение точности определения остаточного ресурса фрезерной компоновки с помощью оценки твердости и показателя дефективности элементов фрезерной компоновки в зависимости от срока эксплуатации, что может помочь в определении момента вывода изделия из эксплуатации.

Ключевые слова: фрез, усталостное разрушение, напряжения, слом, срок службы.

Большинство нефтегазовых месторождений, разрабатываемых в Российской Федерации, находятся на заключительной стадии эксплуатации. В связи с этим вопрос повышения эффективности и рентабельности добычи становится крайне важным. Одним из самых эффективных методов восстановления бездействующих и повышения нефтеотдачи малодебитных скважин является бурение бокового ствола [6].

На данный момент широко применяется методика забуривания бокового ствола из обсаженной эксплуатационной колонны вертикальной или наклонной скважины: вырезка «окна» в обсадной колонне при помощи вырезающих фрез с устанавливаемого клина-отклонителя и последующей зарезки бокового ствола скважины с этого клина-отклонителя [2].

Основные достоинства данного способа строительства бокового ствола скважин включают:

1) точность направления бурения обеспечиваемого заранее установленным и ориентированным клином-отклонителем;

2) возможность применения роторного бурения;

3) минимизация объема фрезеруемого металла (для данного метода зарезки бокового ствола скважины необходимо вырезать около 7-8 метров обсадной колонны), что сокращает количество спуско-подъемных операций;

4) вырезка нескольких колонн одновременно;

5) способность вырезки «окна» в обсадных колоннах любой прочности, включая те, что плохо закреплены.

Клин-отклонитель представляет собой устройство, включающее в себя желоб с отклоняющей поверхностью под различными углами наклона и узла фиксации для его закрепления в обсадной колонне. Клин-отклонитель опускают в скважину вместе со стартовым фрезером при помощи спускового устройства. Для осуществления направленной вырезки «окна» в колонне клин-отклонитель ориентируют по азимуту [5].

Когда клин-отклонитель достигает забоя под действием силой тяжести бурильного оборудования происходит отсечение стопорного штифта в узле фиксации клина. Затем плашка, передвигаясь по направляющим, высвобождается из механизма фиксации и внедряется в стену обсадной колонны. Фиксирующий узел надёжно заклинивается в колонне, предотвращая вращение клина-отклонителя, что исключает необходимость его цементации. С увеличением нагрузки на клин-отклонитель он отделяется от стартового фрезера. Затем путём вращения инструмента осуществляется первичное фрезерование обсадной колонны. Далее, используя оконный фрез, формируется «окно» в обсадной колонне, после чего арбузообразный фрез выполняет его калибровку. По завершении процесса, когда фрезерная компоновка покидает колонну, осуществляется замена компоновки для продолжения бурения бокового ствола [3].

В процессе бурения фрезерная компоновка постоянна подвергается напряжениям растяжения сжатия, изгиба и кручения, что приводит к выходу из строя элементов фрезерной компоновки. Большинство поломок фрезерной компоновки связано с усталостью [8]. Наибольший уровень концентраций напряжения находится в резьбовых соединениях и в зоне перехода бурильной трубы.

Типы повреждений резьбовых соединений можно классифицировать на две категории: выкрашивание витков и разрушение конусной части муфты или ниппеля. В случае выкрашивании витков усталостные трещины, возникающие в углублениях между соседними витками, проникают внутрь структуры резьбы до момента их соединения, что ведет к их отлому [8].

Чаще всего выкрашивание витков происходит в местах, прилегающих к большему или меньшему диаметру конуса. Когда происходит одновременное разрушение нескольких витков, интенсивность разрушения постепенно снижается от крайних витков, расположенных ближе к сопряжению, к центральным виткам. Это явление во многом обусловлено неоднородным распределением нагрузок между витками и различиями в конусности ниппеля и муфты [1].

Формирование усталостных трещин начинается у впадин резьбы и продолжается вглубь материала, иногда переходя ступенчато с одного витка на другой [7]. Размеры разрушенных участков на конусе ниппеля могут варьироваться от одного витка до полного разрушения конуса рис.1.



Рис. 1. Усталостное разрушение ниппельной части фреза по впадине первого витка

Износ резьбы оказывает существенное влияние на её разрушение. Если момент затяжки недостаточен, это может привести к скольжению между контактирующими поверхностями профиля резьбы при переменном изгибе, что ускоряет износ профиля и, как следствие, способствует его последующему разрушению [10].

Диагностика состояния фрез при зарезке бокового ствола, прогнозирование остаточного ресурса производится различными методами. При этом эффективными являются интервальные оценки вероятности появления усталостных трещин и времени эксплуатации установленной фрезы. В качестве методов интервальной оценки используют построение математических моделей: зависимость срока службы фрезы от твердости, действующих внешних сил, возникающих напряжений и циклов нагружений.

Интервальные оценки используют функции распределения, такие как: функция Гаусса, биномиальное распределение, гипергеометрическое распределение, критерий Граббса, критерий Бесселя, функцию Лапласа и другие.

Точность оценки текущего состояния фрезы при максимальной доверительной вероятности позволит спрогнозировать решение о замене или продолжении дальнейшей работы фрезы.

Известен способ определения остаточного ресурса деталей машин [4], которая включает анализ остаточного ресурса на основании изменения среднего времени эксплуатации, постоянного процесса сбора диагностических данных и его расчета как разницы между предполагаемым средним временем службы и фактическим временем использования на момент проверки.

Наряду с этим прогнозирование среднего срока службы осуществляется методом Лапласа для случайных величин, который включает многократное измерение параметра, отражающего ресурс компонента. Это сопровождается созданием графика, показывающего изменение этого параметра до достижения его предельного уровня. После этого проводятся аналогичные измерения для других параметров, определяющих ресурс компонента. Полученные данные подвергаются статистическому анализу, объединяются в единую базу данных, на основе которой рассчитываются среднестатистические значения среднего ресурса. Остаточный ресурс компонента определяется по формуле, основанной на этих параметрах.

Одним из потенциальных недостатков этого метода является использование техники расчета, при которой степень износа считается прямо пропорциональной времени эксплуатации, что не всегда соответствует реальности. Кроме того, в качестве информативных используются лишь крайние показатели диагностических параметров, достигнутые при критическом состоянии детали, в то время как не принимаются во внимание их абсолютные значения и динамика изменений в ходе использования. Это ограничивает возможность точной оценки текущего состояния износа детали на основе фактических диагностических данных.

Технический эффект заключается в улучшении надежности и точности при определении оставшегося ресурса деталей машин. Достижение этого результата обеспечивается путем периодического измерения параметров с интервалами, начиная от времени ввода детали в эксплуатацию и до момента ее выхода из строя. Затем, используя метод регрессионного анализа, создаются аппроксимирующие функции, формирующие непрерывную функциональную связь между параметрами ресурса компонента и временем его использования:

$$T_{\text{ост}} = \left(\frac{T_{\text{диаг}}}{T_{\text{пред}}}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $T_{\text{диаг}}$ – срок службы детали, который определяется на основе значений параметров, отражающих его ресурс; $T_{\text{пред}}$ – максимальный срок эксплуатации детали, который соответствует критическим показателям, определяющим его рабочий ресурс.

Предлагается способ определения остаточного ресурса деталей машин, который заключается в создании модели, отражающей изменение определённого параметра, связанного с ресурсом компонента во времени до достижения его критического уровня с учетом коэффициента нагрузки на элементы деталей. Этот процесс включает измерение этого и других связанных параметров с определённой периодичностью с начала использования компонента до момента, когда он достигает предельного состояния. Полученные данные подвергаются статистической обработке и объединяются в единую базу данных. Затем, используя метод Лапласа, формируются аппроксимирующие функции, которые обеспечивают непрерывное отображение изменения параметров ресурса компонента в зависимости от времени его эксплуатации, что позволяет определить остаточный срок его службы по формуле:

$$T_{\text{ост}} = \left(\frac{T_{\text{диаг}}}{T_{\text{пред}}} \cdot k\right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $T_{\text{диаг}}$ – срок службы детали, который определяется на основе значений параметров, отражающих его ресурс; k – коэффициент нагрузки, который показывает какая сила приложена к элементам детали; $T_{\text{пред}}$ – максимальный срок эксплуатации детали, который соответствует критическим показателям, определяющим его рабочий ресурс.

Результаты еженедельной диагностики представлены в виде графика зависимости значений величин твердости и показателя дефектности от срока эксплуатации представлены на рис. 2. График построен на основании анализа записей ГТИ (геолого-технических исследований), указанных в статье [7].

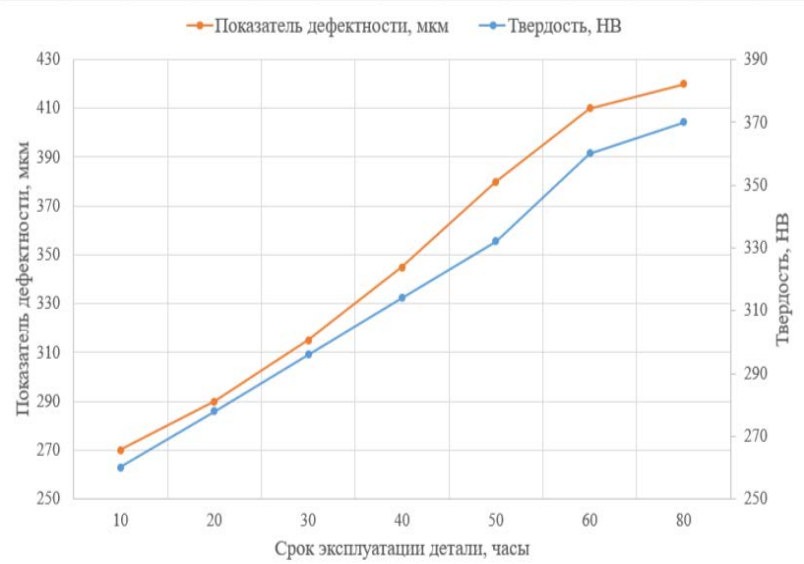


Рис.2. График зависимостей твердости и дефективности от срока эксплуатации

Знание и прогнозирование состояния оборудования в процессе его работы позволяет заранее принять меры для предотвращения возможных проблем и аварий. В частности, информация о состоянии фрез является наиболее ценной, так как аварии, связанные с ними, считаются одними из самых сложных [9].

Оценка степени изношенности фрез при зарезке второго ствола и прогнозирование времени их работы до отказа являются важными задачами, решение которых может существенно повысить эффективность и безопасность бурения.

Список литература

1. Басарыгин Ю.М., Проселков Ю.М. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин. М.: Недра, 2000. 385 с.

2. Кемалов Р.А., Тухбиев Р.Ф., Кемалов А.Ф. Методы строительства боковых стволов для восстановления скважин из бездействия на примере различных месторождений РФ // Природные энергоносители и углеродные материалы & Natural energy sources and carbon materials. 2021. № 1(07) [Электронный ресурс] URL: https://s.econf.rae.ru/pdf/2017/05/6236.pdf (дата обращения: 19.06.2024).

3. Оборудование и инструменты для зарезки боковых стволов // [Электронный ресурс] URL: https://goo.su/U4gpP (дата обращения: 19.06.2024).

4. Патент 2795665 РФ. Способ определения остаточного ресурса деталей машин / Д.С. Громыка, К.В. Гоголинский, Ю.Д. Смирнов, Э.А. Кремчеев. Опубл. 18.07.2022. Бюл. №13.

5. Ропяной А.Ю., Скобло В.З. Ориентирование бурового инструмента и контроль траектории бурения при забуривании боковых стволов из обсадных колонн вертикальных скважин // Нефть и газ в журнале «Бурение и нефть» [Электронный ресурс] URL: https://burneft.ru/archive/issues/2018-05/47 (дата обращения: 19.06.2024).

6. Салихов И.М., Ахмадуллин Р.Р., Кормухин В.А., Сайфутдинов М.А. Стабилизация добычи нефти за счет бурения боковых стволов на примере Южно-Нурлатского месторождения НГДУ «Нурлатнефть» ОАО «Татнефть» // Нефть и газ в журнале «Бурение и нефть» [Электронный ресурс] URL: https://burneft.ru/archive/issues/2009-12/7 (дата обращения: 19.06.2024).

7. Хакимов Д.А., Чистов Д.И. Определение остаточного ресурса элементов фрезерной компоновки // Энергия молодёжи для нефтегазовой индустрии. Альметьевск: ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт», 2023.

8. Albdiry M.T., Almensory M.F. Failure analysis of drillstring in petroleum industry // Engineering Failure Analysis, 2016. 75 p.

9. Wang J., Xue Q., Li L., Huang L., Li F., Liu B. Influence of flex-sub on mechanical properties of rotary steerable drilling system, 2020. P. 285–297.

10. Jaroslav M. Time to Failure of Deteriorating Objects // Concise Reliability for Engineers, 2016. 43 p.

Чистов Дмитрий Игоревич, канд. тех. наук, доцент, chistov.mf@mail.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет,

Имаева Эмма Шаукатовна, канд. тех. наук, доцент, imaeva2014@yandex.ru, Россия, Уфа, Уфимский государственный нефтяной технический университет

INCREASING THE ACCURACY OF DETERMINING THE RESIDUAL LIFE OF A MILLING ASSEMBLY

D.A. Khakimov, D.I. Chistov, E.S. Imaeva

The article discusses the principle of increasing the accuracy of determining the residual life of a milling assembly by assessing the hardness and defectiveness index of the elements of the milling assembly depending on the service life, which can help in determining the moment of decommissioning of the product.

Key words: milling cutter, fatigue failure, stress, breakage, service life.

Chistov Dmitry Igorevich, candidate of technical sciences, docent, chistov.mf@mail.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

Imaeva Emma Shaukatovna, candidate of technical sciences, docent, imaeva2014@yandex.ru, Russia, Ufa, Ufa State Petroleum Technological University,

УДК 67.02, 620.172
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-562-563

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ FDM-ПЕЧАТИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИЭФИРСУЛЬФОНА

И.С. Говоров

В работе исследуется влияние параметров FDM- печати на физико-механические свойства изделий из полиэфирсульфона (ПЭС). ПЭС - высокотемпературный полимер, который отличается устойчивостью к нагреванию, высокими механическими показателям и стабильностью в различных условиях эксплуатации, что делает его перспективным материалом для применения в промышленности. Исследования проведены для трех ключевых параметров печати: температуры сопла, температуры камеры и угла наклона растра. План эксперимента построен по методу Box-Behnken, что позволило установить регрессионные зависимости между параметрами печати и качеством изделий (прочностью на растяжение и шероховатостью поверхности).

Ключевые слова: FDM – печать, полиэфирсульфон, предел прочности при растяжении, регрессионные модели, шероховатость поверхности.

Введение. Метод послойного осаждения (FDM) — это технология 3D-печати, в которой используются термопластичные материалы в виде нитей (филаментов). В процессе создания изделия материал наносится по заранее определенной схеме слой за слоем. В настоящее время FDM-печать является наиболее широко используемой технологией в различных отраслях промышленности для создания изделий различного назначения от детских игрушек и сувениров до деталей самолетов и автомобилей и в определенной степени является синонимом термина «3D-печать» [1]. Наибольший интерес в аддитивных технологиях связан с печатью «высокотемпературных пластиков».

В последнее время область применения FDM-печати существенно расширилась за счет высокотемпературных термопластов, таких как полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полиэфиркетонкетон (ПЭКК), полиэфиримид (ПЭИ), полиэфирсульфон (ПЭС) (рис. 1).

Полиэфирсульфон является высокотемпературным термопластом, обладающим высокой термостойкостью. Полиэфирсульфон особенно известен своими термическими свойствами: он может выдерживать очень высокие температуры (до 220 °C) даже в жидкой и паровой среде при температуре до 170 °C; обладает огнестойкими свойствами, что делает его предпочтительным материалом для аэрокосмической, железнодорожной и автомобильной промышленности. Для сравнения: материал начинает разрушаться при температуре выше 400 °C, а горение начинается при температуре от 475 до 575 °C. Помимо этого ПЭС безопасен для пищевых продуктов, выдерживает очень высокие нагрузки и обладает хорошей электроизоляцией и диэлектрическими свойствами. ПЭС также отличается превосходной химической стойкостью, что делает его устойчивым к воздействию различных кислот, щелочей и органических растворителей даже при сильном химическом воздействии [2]. Его высокая механическая прочность и жёсткость делают его подходящим для применения в областях, требующих структурной целостности и несущей способности. Кроме того, ПЭС сохраняет стабильность размеров даже в экстремальных условиях, включая высокие температуры и различные среды.

ПЭС является аморфным термопластом, имеющим неупорядоченную молекулярную структуру. В отличие от полукристаллических термопластов ему сравнительно легко придать форму, поскольку он меньше подвержен эффектам сжатия и расширения при изменении температуры. Температура плавления ПЭС лежит в диапазоне от 340 до 390 °C. Если сравнить его, например, с полиэфиримидом (известным так же, как ULTEM), который теперь доступен в виде нитей, то ПЭС не только обладает лучшими характеристиками, но и значительно дешевле. Кроме того, полиэфирсульфон значительно меньше впитывает влагу и поэтому представляет собой альтернативу, которую стоит серьёзно рассмотреть [3]. Благодаря исключительной термостойкости, стабильности размеров и пригодности для различных методов обработки полиэфирсульфон является универсальным материалом для автомобильной промышленности, электроники, медицины и промышленности. В то время как отрасли продолжают искать инновационные решения, полиэфирсульфон остаётся эталоном надёжности.

В настоящее время, FDM-печать из ПЭС мало изучена и целью данной работы, является исследование влияния параметров печати на физико-механические свойства напечатанных образцов. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

на основе результатов эксперимента для выбранных технологических параметров процесса 3D-печати построить регрессионные зависимости факторов качества изделия, определяющих требуемое свойство изделия (прочность, шероховатость поверхности);

проанализировать полученные зависимости и дать рекомендации для выбора значений параметров печати, обеспечивающих необходимые свойства изделия при печати из ПЭС.

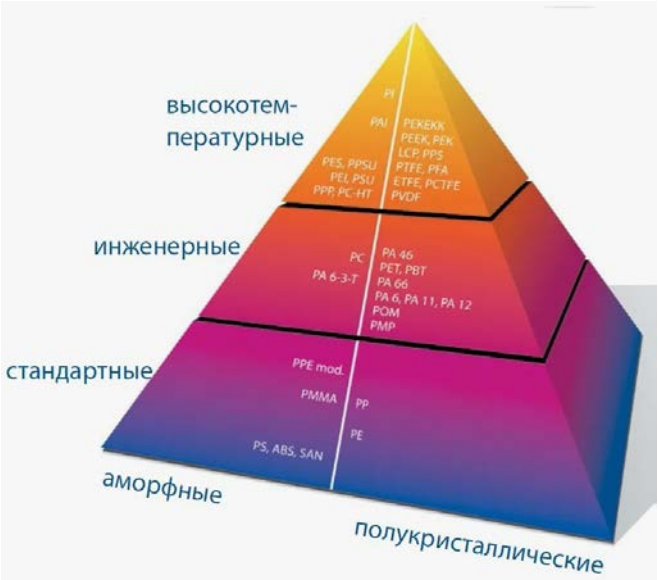


Рис. 1. Пирамида пластиков

План эксперимента. Для проведения эксперимента в качестве исследуемых параметров печати были выбраны следующие (табл. 1) [4].

Таблица 1

Исследуемые параметры печати

Уровень	Температура сопла, Т, °С	Температура камеры, Тс, °С	Угол наклона растра, rastr °
#1	350	150	0
#2	365	160	45
#3	380	170	90

Для реализации работы и получения регрессионных уравнений использовалась программа Minitab. План эксперимента был построен по методу Box-Behnken таким образом, что в каждой группе изготовленных образцов одновременно изменялось только значение одного параметра печати (табл. 2). [5]

Таблица 2

План эксперимента

Группа образцов	Температура сопла, Т, °С	Температура камеры, Тс, °С	Угол наклона растра, rastr °
#1	350	150	45
#2	380	150	45
#3	350	170	45
#4	380	170	45
#5	350	160	0
#6	380	160	0
#7	350	160	90
#8	380	160	90
#9	365	150	0
#10	365	170	0
#11	365	150	90
#12	365	170	90
#13	365	160	45
#14	365	160	45
#15	365	160	45

Методика экспериментальных исследований. При подготовке образцов для экспериментального исследования следовали плану, представленному в табл. 2, и стандартам. Для каждого набора параметров было напечатано по три образца.

Экспериментальные исследования проводилась на образцах, изготовленных из ПЭС по ГОСТ 11262-2017 (рис.2) [6].

Катушка с филаментом была предварительно просушена в вакуумном сушильном шкафу в течение шести часов при температуре 130°С.

С целью выбора параметров печати перед началом экспериментов определялись термические и реологические характеристики материала для печати. Термические характеристики измерялись методом, основанным на измерении теплового потока между исследуемым образцом и эталоном в контролируемых температурных условиях, с помощью дифференциального сканирующего калориметра SKZ1052F. Показатель текучести расплава измерялся на установке ПТР-ЛАБ-11 по ГОСТ 11645-2021 (температура 360 °С/ нагрузка10 Кг).

Термические и реологические характеристики ПЭС-пластика, используемого для печати образцов, приведены в табл. 3.

Предпечатная подготовка заключалась в проектировании трехмерной модели образца с использованием САПР SolidWorks, сохранении геометрии в формате STL и разбиении на слои с помощью программного обеспечения Ultimaker Cura 5.2.1. Печать образцов производилась на 3D-принтере Total Z AnyForm 500 PRO.

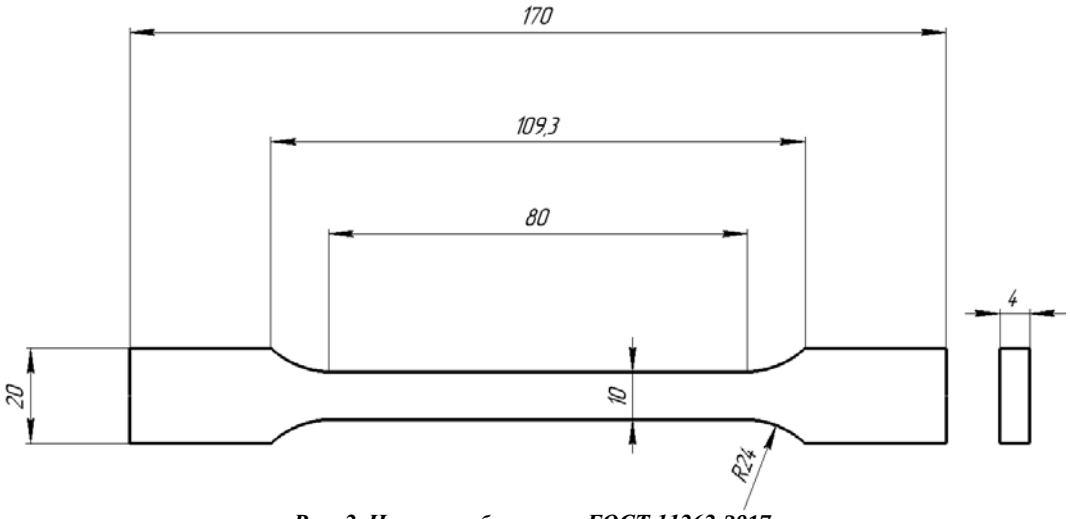


Рис. 2. Чертеж образца по ГОСТ 11262-2017

Таблица 3

Термические и реологические характеристики ПЭС-пластика

Показатель	Значение
Температура стеклования, °С	228
Температура плавления, °С	380
Начальная температура деструкции, °С	510
Конечная температура деструкции, °С	580
Показатель текучести расплава, г/10 мин	70

Шероховатость поверхности образцов после печати измерялась с помощью прибора SURFCORDER SE1700A по стандартной методике. Прочность при разрыве определяли на разрывной машине в соответствии с ГОСТ 11262-80. Испытания проводились на универсальной испытательной машине РЭМ-А

Результаты и обсуждение. Реализация алгоритма пошагового регрессионного анализа экспериментальных результатов, представленных в табл. 4, позволила найти уравнения регрессии для факторов качества в зависимости от принятых параметров печати для выбранного материала ПЭС. В результате проведения экспериментов были получены значения физико-механических свойств образцов, напечатанных при различных параметрах. В табл. 4 представлены средние значения предела прочности и шероховатости поверхности, полученные непосредственно в результате экспериментов. В табл. 5 представлены средние значения предела прочности и шероховатости поверхности для каждой группы образцов, рассчитанные с использованием регрессионной модели.

Ra = -155 + 0,774 T + 0,322 Tc + 0,6155 rastr - 0,001000 T*T - 0,00050 Tc*Tc- 0,001815 rastr*rastr - 0,000500 T*Tc - 0,000815 T*rastr + 0,000278 Tc*rastr

σ = -2575 + 11,16 T + 6,97 Tc + 0,494 rastr - 0,01500 T*T - 0,02125 Tc*Tc- 0,001914 rastr*rastr + 0,00000 T*Tc - 0,002593 T*rastr + 0,00111 Tc*rastr

где Ra – шероховатость поверхности; σ – предел прочности при растяжении

Таблица 4

Средние экспериментальные значения предела прочности и шероховатости поверхности образцов

Группа образцов	σ, МПа	Шероховатость Ra, мкм
#1	46	17,6
#2	50	15,6
#3	49	17,2
#4	53	14,9
#5	65	4,2
#6	70	3,1
#7	29	23,4
#8	27	20,1
#9	67	4
#10	72	4
#11	25	21,5
#12	32	22
#13	55	16,6
#14	55	16,6
#15	55	16,6

Таблица 5

Средние значения предела прочности и шероховатости поверхности образцов, рассчитанные по регрессионным моделям

Группа образцов	σв, МПа	Шероховатость, Ra
#1	45,8819	17,26238
#2	48,68135	15,23213
#3	50,2809	17,25258
#4	53,08035	14,92233
#5	64,7	4,12
#6	71	3,04

#7	27,9611	23,1442
#8	27,26	19,8637
#9	67,4	3,96
#10	70,8	3,55
#11	26,16155	21,63375
#12	31,55955	21,72415
#13	54,98113	16,44235
#14	54,98113	16,44235
#15	54,98113	16,44235

На рис. 4 и 5 приведены параметрические поверхности, построенные по полученным регрессионным зависимостям для различных параметров процесса FDM-печати для образцов, напечатанных при температуре сопла T=380 °C.

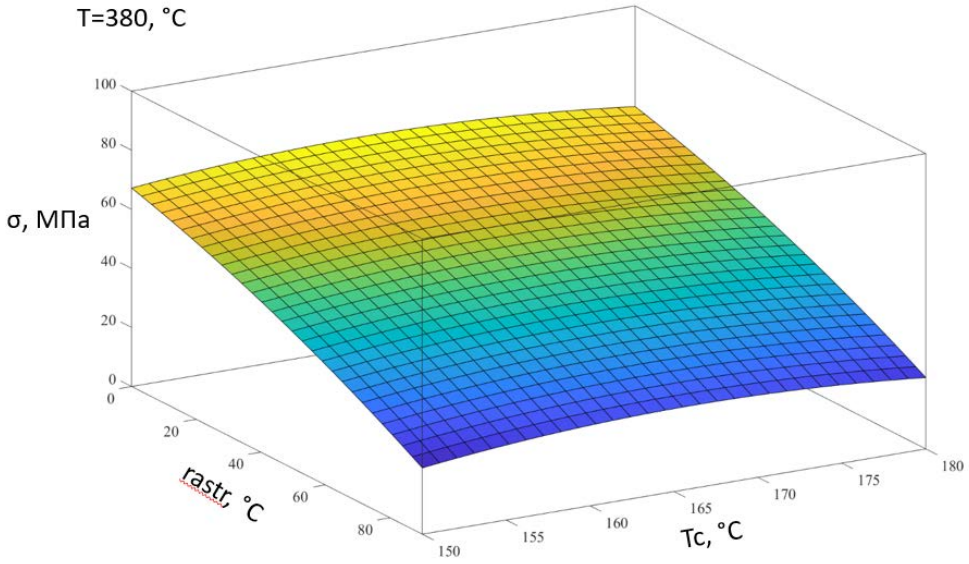


Рис. 5. Параметрические поверхности предела прочности образцов при растяжении

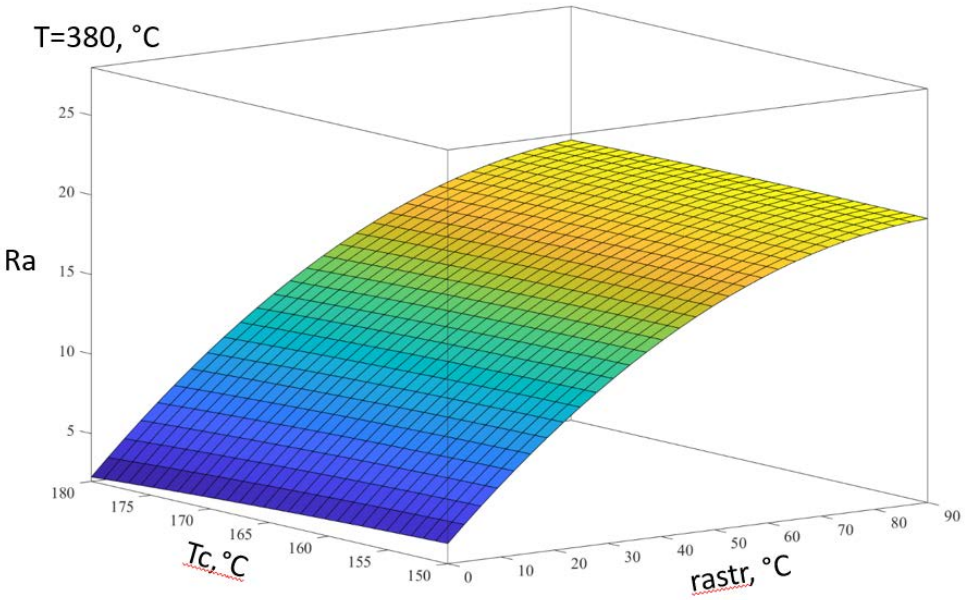


Рис. 6. Параметрические поверхности шероховатости образцов

Заключение. При сравнении результатов, полученных экспериментальным данным (табл. 4)и по регрессионным зависимостям (табл. 5), установлено, что модель, построенная по плану Box-Behnken, имеет 2% погрешности. Таким образом, регрессионная модель имеет достаточно высокую точность и может быть применима для выбора рациональных параметров печати. Наилучших показателей физико-механических свойств удалось достичь для группы образцов #10 (σ = 72 МПа, Ra = 4 мкм) при следующих значениях параметров печати: T = 380°C; Tc = 160 °C; rastr = 0°.

Работа выполнена в рамках гранта ректора ТулГУ для обучающихся по образовательным программам высшего образования программ магистратуры ЭИНТ/23/01/ГРР_М от 12.12.2023

Список литературы

1. Wickramasinghe S., Do T., Tran P. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments // Polymers. 2020. V.12(7). P.1529.
2. Ahmad A. L. et al. Recent development in additives modifications of polyethersulfone membrane for flux enhancement // Chemical engineering journal. 2013. V. 223. P. 246-267.
3. Zhao C. et al. Modification of polyethersulfone membranes–A review of methods // Progress in Materials Science. 2013. V. 58(1). P. 76-150.
4. Dey A., Yodo N. A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2019. V.3(3). V. 64.
5. Ferreira S. L. C. et al. Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods // Analytica chimica acta. 2007. V.597(2). P. 179-186.
6. ГОСТ 11262-2017 Пластмассы. Метод испытания на растяжение. Часть 1. Образцы для испытания. М.: Стандартинформ.2017. 20 с.

Говоров Иван Сергеевич, магистрант, vanya.govorov.2001@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STUDIES OF THE EFFECT OF PRINTING PARAMETERS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PRODUCTS FROM POLYESTERSULFONE

I.S. Govorov

The paper investigates the effect of the parameters of printing (FDM) on the physical and mechanical properties of polyethersulfone (PESU) products. This high-temperature polymer is characterized by resistance to heat, high mechanical properties and stability in various operating conditions, which makes it a promising material for industrial applications. Three key printing parameters were selected for analysis: nozzle temperature, camera temperature, and raster tilt angle. The experiment was built using the Box-Behnken method, which allowed us to establish regression relationships between printing parameters and product quality (tensile strength and surface roughness).

Key words: FDM printing, plastic - PESU, tensile strength, regression models, roughness.

Govorov Ivan Sergeevich, master, vanya.govorov.2001@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.01
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-566-567

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ТОКАРНОГО ЦЕНТРА

Е.И. Яцун, Г.В. Урванцев

Рассмотрены вопросы автоматизации токарного центра применением промышленного робота для увеличения количества обслуживаемых станков одним оператором при дефиците кадров в промышленности. Обоснование выполнено с использованием методики анализа конструктивных параметров детали-представителя для выявления целесообразности применения промышленного робота загрузки-выгрузки детали и расчета коэффициента многостаночности с учетом количества станков, включенных в гибкий производственный модуль.

Ключевые слова: обрабатывающий центр, гибкий производственный модуль, оператор, промышленный робот, технологичность изделия, многостаночное обслуживание.

Гибкие автоматизированные производства, создаваемые на базе промышленных роботов, позволяют решать задачи автоматизации на предприятиях с широкой номенклатурой продукции при дефиците кадров.

Для автоматизации загрузки-выгрузки заготовок необходим анализ всей номенклатуры изделий, изготовляемых в цехе или на участке, с целью проверки на технологичность изделий с точки зрения оснащения роботом. Поэлементный анализ конструкции детали дает возможность на стадии технологической подготовки производства оценить количественно возможность и техническую целесообразность автоматического выполнения операций ориентации в пространстве роботом, межоперационного транспортирования, загрузки в рабочие пространства технологических машин и выгрузки из них [1-10].

Соответствие конструкции изделия условиям автоматизированного производства оценивается методом инженерного анализа технологичности детали, экспертным методом и методом дифференциальных оценок [11-16].

Основной задачей исследования является определение коэффициента многостаночности и количества станков, включенных в гибкий производственный модуль (ГПМ) и входящих в состав гибкой производственной системы ГПС) как основной элемент. ГПМ состоит из металлообрабатывающего станка с устройством ЧПУ, устройства автоматической смены инструмента, системы охлаждения, устройства для сбора и удаления стружки; индикаторного устройства для контроля состояния режущего инструмента и контроля точности обработки заготовки, транспортно-накопительного оборудования; промышленного робота.

Соответствие конструкции изделия условиям автоматизированного производства оценивается методом инженерного анализа технологичности детали и дает качественную оценку – «технологично – нетехнологично». Этот метод носит достаточно субъективный характер – достоверность оценки в значительной степени зависит от квалификации и опыта осуществляющего этот анализ специалиста. Для более объективной оценки технологичности

применяется **метод экспертных оценок** – анализ проводится группой специалистов-экспертов независимо друг от друга. Количественные оценки технологичности, проставляемые экспертами по балльной системе в специальных анкетах, обрабатываются методами математической статистики и дают более объективный результат при минимальной вероятности грубых ошибок**.** Поэлементный анализ конструкции детали дает возможность на стадии технологической подготовки производства оценить количественно возможность и техническую целесообразность автоматического выполнения операций ориентации в пространстве роботом, межоперационного транспортирования, загрузки в рабочие пространства технологических машин и выгрузки из них, базирования и т. д. В случае выявления сложности и нецелесообразности автоматической загрузки-выгрузки детали, ее ориентации в машинах-автоматах и автоматических линиях, вырабатываются рекомендации по изменению конструкции детали.

Методом экспертных оценок выявлены параметры детали, оказывающие наибольшее влияние на трудоемкость ее изготовления:

- квалитет точности;
- шероховатость поверхностей;
- предельные отклонения;
- габариты детали;
- масса детали;
- материал детали.

Для уточнения оценки технологичности детали необходимо определить трудоемкость ее изготовления. Регрессионный анализ позволяет определить технологичность детали и возможность применения робота для ее ориентации, загрузки и выгрузки в ГПМ.

Уравнение регрессии корреляционной связи между трудоемкостью T и параметрами детали имеет вид:

$$T = F\left\{M, \left|\sum_{i=1}^{n} f(S_{i,} R_{ai}, t_i)\right\} k_m, \quad (1)$$

где M – масса детали, кг; S_i – площадь обрабатываемой i-й поверхности, мм^2; R_{ai} – шероховатость i-й поверхности, мкм; t_i – допуск i-й поверхности, мкм; k_m – коэффициент, учитывающий обрабатываемость материала детали.

После решения уравнения трудоемкость выражается уравнениями:

$$T = b_0 \cdot M^{y1} \cdot k^{y2}, \quad (2)$$

$$K = a_0 \cdot S^{x_1} \cdot R_{ai}^{x_2} \cdot t^{x_3}, \quad (3)$$

где a_0, x_1, x_2, x_3, y_1, y_2 – коэффициенты, определенные экспериментально.

Автоматизированная система расчета трудоемкости реализована как приложение для САПР КОМПАС 3D. Автоматизированная система имеет несколько уровней, включающих: название детали по классификатору; материал детали; тип заготовки (прокат, литье, штамповка); кодированные поверхности, составляющие деталь (цилиндр, конус, сфера и т.д.); квалитет; шероховатость; допуск.

В результате работы программы формируется технологический код детали (рис. 1), рассчитывается трудоемкость ее изготовления и даются рекомендации о возможности применения робота для ее ориентации, установки-снятия и транспортировки.

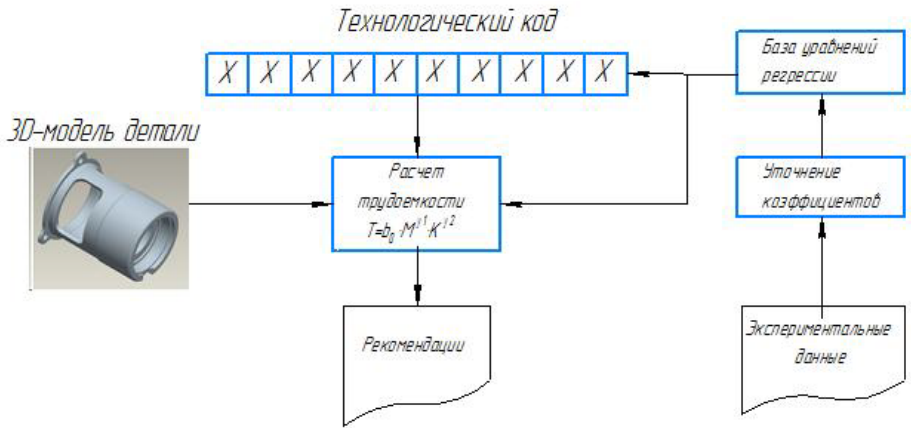


Рис. 1. Структурная схема определения технологичности детали

Совместно метод экспертных оценок и регрессионный анализ в результате позволяет дать следующие рекомендации:

1. Деталь достаточно простой формы и технологична для автоматизации операций ориентации, загрузки-выгрузки, базирования и транспортирования известными техническими средствами.
2. Деталь средней сложности. Автоматизация требует отработки системы ориентации и загрузки детали.
3. Деталь высокой сложности для автоматизации. Необходимо обоснование технико-экономической целесообразности с учетом сложности создания средств автоматизации.
4. Автоматизация загрузки-выгрузки детали, ее ориентации, автоматизация нецелесообразна.

Длительность T_0 цикла обработки одной заготовки в ГПМ равняется:

$$T_0 = t_0 + t_{всп},$$

$$t_{всп} = t_1 + t_2 + \ldots + t_7 + t_в,$$

где t_0 – время обработки заготовки на станке; t_1 – время взятия заготовки роботом с пластины стола и подъема руки в верхнее положение (при начальном нахождении руки в исходном состоянии); t_2 – время транспортирования заготовки к 3-х кулачковому патрону, располагаемому в шпинделе станка; t_3 – время закрепления заготовки в 3-х кулачковом патроне; t_4 – время вывода руки робота из рабочей зоны станка; t_5 – время перемещения руки к 3-х кулачковому патрону; t_6 – время взятия детали из 3-х кулачкового патрона; t_7 – время перемещения руки к пластине разгрузочного стола; $t_в$ –время размещения детали на разгрузочном столе и перемещения руки в исходное положение к загрузочному столу.

Наибольшую длительность имеет время t_0 обработки заготовки на станке, которое рассчитано при разработке технологического процесса и является заданной величиной. Остальные временные интервалы определяются после разработки алгоритма управления роботом.

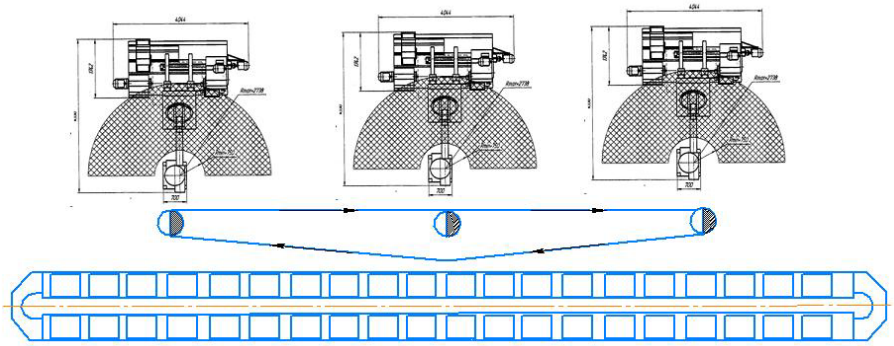
Уточненный коэффициент многостаночности определен с учетом рекомендаций [17, 18] с использованием аналитических зависимостей.

Коэффициент многостаночности – это поправочный коэффициент к штучному времени при многостаночном обслуживании. Используются следующие величины коэффициентов многостаночности: при обслуживании двух станков – 0,75; при обслуживании трёх станков – 0,6; при обслуживании четырёх станков – 0,45.

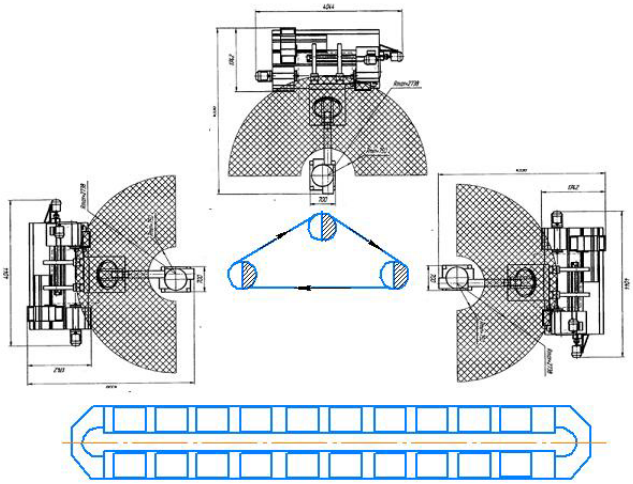
Норма штучного времени при многостаночной работе в среднесерийном производстве рассчитывается по формуле:

$$\tau_ш = \frac{T_{шт}}{n_c} \cdot K_c , \tag{4}$$

где $T_{шт}$ – штучное время при работе на одном станке, мин; n_c – количество станков; K_c – коэффициент совпадения.



а



б

Рис. 2. Рекомендуемые схемы расположения оборудования при многостаночном обслуживании: а – линейная; б – П-образная

Значение коэффициента совпадения K_c зависит от допустимой занятости оператора $K_{оз}$, количества обслуживаемых станков и выбирается из [18].

Определим норму штучного времени при многостаночной работе в среднесерийном производстве ($\tau_ш$), если известно штучное время на изготовление детали на одном станке ($T_{шт}$).

Для расчета будем использовать формулу (4).

Величину коэффициента совпадения (K_c) находим при условии, что один оператор работает на двух станках и допустимая величина занятости составляет 0,85, коэффициент совпадения будет равен 1,31.

Тогда норма штучного времени при многостаночной работе составит:

$$\tau_{ш} = \frac{T_{шт}}{2} \cdot 1{,}31$$

или

$$\tau_{ш} = 0{,}66 \cdot T_{шт}.$$

По рекомендациям $t_{ш} = 0{,}6$ при обслуживании трех станков с ЧПУ оператором. С учетом быстродействия руки робота на установку и снятие детали, что существенно меньше по сравнению с этими же операциями, выполняемыми вручную, полученный расчетом коэффициент $t_{ш} = 0{,}66$ снизится до 0,6.

Рекомендуемые схемы расположения оборудования при многостаночном обслуживании показаны на рис. 2 [18, 19].

Если применить П-образную расстановку станков (рис. 2, б), время наблюдения оператором за ходом технологического процесса и время перехода от станка к станку также снизится. То есть, при использовании промышленного робота гарантировано обслуживание одним оператором трёх станков за смену.

Использование робота 3-го поколения с системой технического зрения позволит оперировать деталями, не имеющими определенного положения.

Дефицит самих роботов устраняется созданием роботов с применением систем технического зрения и методов искусственного интеллекта для корректировки траектории движения.

Список литературы

1. Моисеев Ю.И. Применение промышленных роботов для загрузки металлообрабатывающего оборудования. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2013. 170 с.

2. Вороненко В.П., Соломенцев Ю.М., Схиртладзе А.Г. Проектирование машиностроительного производства. М.: Изд-во Дрофа, 2006. 380 с.

3. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ, 2004. 478 с.

4. Челпанов И.Б., Колпашников С.Н. Схваты промышленных роботов. Л.: Машиностроение, 1989. 287 с.

5. Иноземцев А.Н., Троицкий Д.И., Креслинь М.В. Автоматизация оперативного управления процессом квалиметрической оценки технологичности деталей машин при проектировании // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 1. С.418-428.

6. Экономическая эффективность применения промышленных роботов [Электронный ресурс]. URL: https://sergeeffff.livejournal.com/216807.html (дата обращения 12.10.2024).

7. Гибкие производственные системы: учебное пособие [Электронный ресурс]. URL: https://mirprom.com/spravka/gibkie-proizvodstvennye-sistemy-uchebnoe-posobie.html-1 (дата обращения 23.09.2024).

8. Гибкие производственные системы механообработки. Методология автоматизированных научных исследований [Электронный ресурс]. URL: http://tntpress.ru/gibkie-proizvodstvennye-sistemy-mehanoobrabotki-metodologiya-avtomatizirovannyh-nauchnyh-issledovanij (дата обращения 23.09.2024).

9. ГОСТ 30097-93. Роботы промышленные. Системы координат и направления движений. [Электронный ресурс]. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294825/4294825155.htm (дата обращения 23.09.2024).

10. Сорокин С.В., Кузнецов В.А., Петреску Ю.С. Автоматизация качественной оценки технологичности деталей машин // Тезисы докладов 35-й междунар. науч.-техн. конф. в рамках междунар. специализ. выставки «Машиностроение-2021». Минск: Изд-во Бизнесофсет, 2021 С. 114-115.

11. Технологичность конструкций изделий для условий автоматизированного производства [Электронный ресурс]. URL: https://studopedia.ru/19_282431_tehnologichnost-konstruktsiy-izdeliy-dlya-usloviy-avtomatizirovannogo-proizvodstva.html?ysclid=lt47fywc9i854638385 (дата обращения 01.10.2024).

12. Амиров Ю.Д. Технологичность конструкции как фактор повышения конкурентоспособности изделия // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 12. С. 35-41.

13. Коришонков С.Н. Понятие о технологичности конструкции изделия // Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения» [Электронный ресурс]. URL: https://extxe.com/29599/tehnologichnost-konstrukcii-izdelij (дата обращения 07.10.2023).

14. Ямникова О.А., Холманов А.И., Французова Ю.В. Оценка технологичности детали типа «Корпус» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 10. С.99-103.

15. Анцев В.Ю., Иноземцев А.Н., Пушкин Н.М. Автоматизация экспресс-оценки трудоемкости изготовления спортивного и охотничьего оружия // Автоматизация и современные технологии. 2002. № 8. С. 18-22.

16. Автоматизированная экспресс-оценка трудоемкости обработки деталей / С.А. Васин, В.Ю. Анцев, А.Н. Иноземцев, Н.И. Пасько // СТИН. 2000. № 10. С. 9-13.

17. Яцун Е.И., Лысенко С.С. Анализ технологичности детали «Корпус» при роботизации производства // Сб. науч. тр. 2-й междунар. молодежн. науч. конф. «Технологии и техника: пути инновационного развития». Курск: «Университетская книга». 2024. С.505-509.

18. Артюшевский А. Расчет коэффициента многостаночности при обработке на станках с ЧПУ // Нормирование и тарификация труда. 2015. № 12. С. 40-41 [Электронный ресурс]. URL: https://www.nitt.by/izdaniya/nitt/raschet-koeffitsienta-mnogostanochnosti-_0000000 (дата обращения 17.09.2023).

19. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть I. Нормативы времени [Электронный ресурс]. URL: https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293832/4293832230.htm (дата обращения 02.10.2024).

Яцун Елена Ивановна, канд. техн. наук, доцент, el.yatsun@gmail.com, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Урванцев Герман Владимирович, студент, mtio29@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет

ROBOTIC TECHNOLOGY COMPLEX ON THE BASIS OF THE TURNING CENTER

E.I. Yatsun, G.V. Urvantsev

The issues of automation of the turning center using an industrial robot to increase the number of serviced machines by one operator with a shortage of personnel in the industry are considered. The justification was carried out using the methodology of analyzing the design parameters of the representative part to identify the feasibility of using an industrial robot for loading and unloading parts and calculating the multi-machine coefficient, taking into account the number of machines included in the flexible production module.

Key words: machining center, flexible production module, operator, industrial robot, product manufacturability, multi-point service.

Yatsun Elena Ivanovna, candidate of technical sciences, docent, el.yatsun@gmail.com, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Urvantsev German Vladimirovich, student, mtio29@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University

УДК 621.7.01
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-570-571

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РК-ПРОФИЛЬНЫХ ВАЛОВ ОХВАТЫВАЮЩЕЙ ФРЕЗОЙ С РАДИАЛЬНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ ПОДАЧЕЙ

Ю.А. Мальнева, В.В. Куц, А.Н. Кальченко, Т.А. Толмачева, Г.В. Урванцев

Статья посвящена исследованию влияния на погрешность формообразования РК-профильных валов различных схем расположения зубьев охватывающей фрезы. Рассматривались схемы расположения с равномерным (постоянным) угловым шагом и неравномерным угловым шагом. Установлены значения чисел зубьев обеспечивающих заданную погрешность формообразования соответствующей различным квалитетам точности. Предложена схема и порядок расчета угловых положений при симметричном расположении зубьев с неравномерным шагом.

Ключевые слова: погрешность формообразования, РК-профильный вал, неравномерный шаг зубьев, охватывающая фреза.

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта «Приоритет 2030 ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Как отмечалось во многих работах, повещенных исследованиям, как самих РК-профильных соединений [1-6], так и технологиям и способам изготовления валов [7-11] и втулок [12-16], образующих эти соединения, что данные соединения имеют ряд эксплуатационных и технологических преимуществ – выше долговечность, меньше шумность при работе, меньшая металлоемкость при сопоставимом передаваемом крутящем моменте и, также, более высокий КПД по сравнению со шлицевыми и шпоночными соединениями.

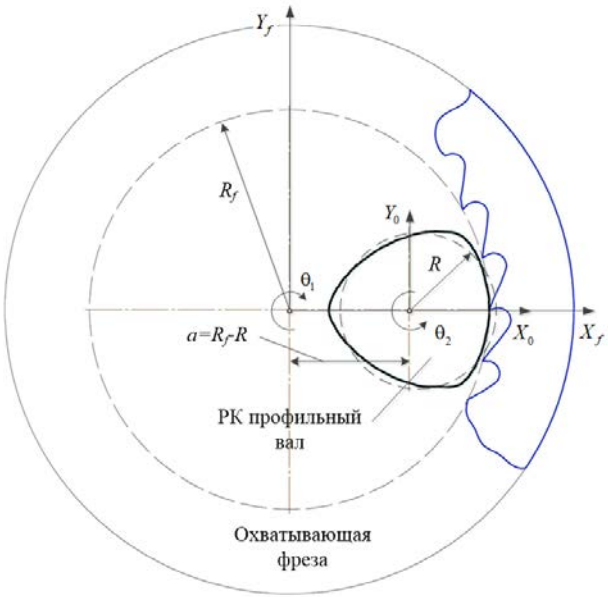


Рис. 1. Схема формообразования РК-профильного вала охватывающей фрезой с конструктивной радиальной подачей

Применительно к изготовлению валов с целью повышения точности обработки в работах [17, 18] был предложен способ обработки, основанный на использовании охватывающей фрезы с конструктивной радиальной подачей. На рис. 1 показана схема обработки в соответствии с эти способом, где фреза и обрабатываемый вал имеют соосное расположение и их взаимное вращение является кинематически связанным, частота вращения фрезы кратно (в соответствии с количеством граней у обрабатываемого профиля) больше частоты вращения вала.

Таким образом, за один оборот фрезы осуществляется формообразование одного участка вала профиля вала.

При расчете величины погрешности формообразования в работе использовались методики расчета, аналогичные приведенным в работах [9-11, 18-20], где рассматривались схемы расположения зубьев, как с равномерным, так и с переменным угловым шагом (рис. 2).

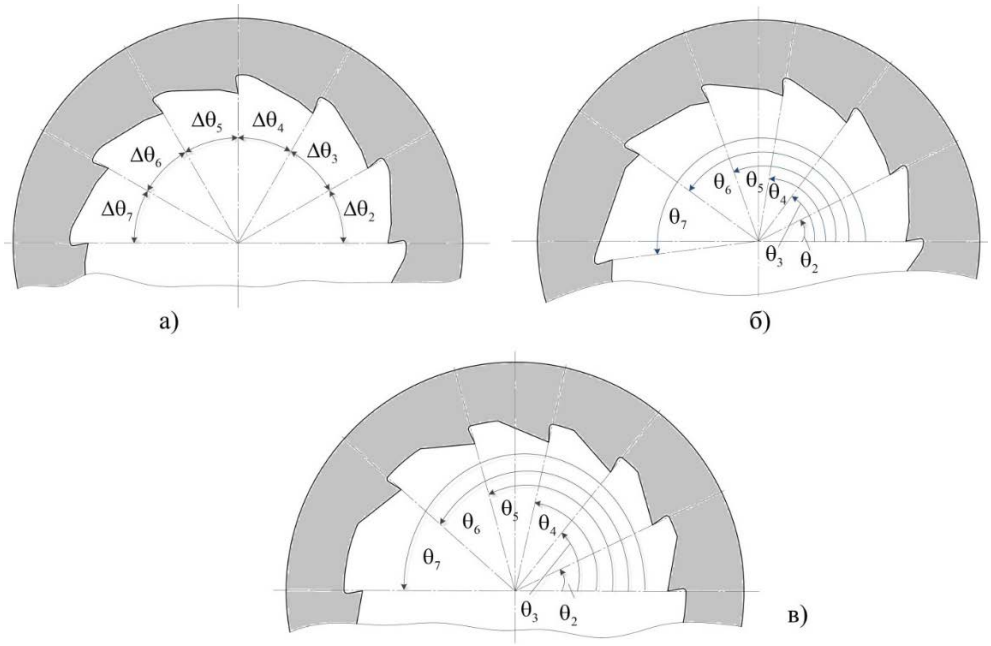


Рис. 2. Расположение зубьев охватывающей фрезы: а – с равномерным угловым шагом; б – с неравномерным угловым шагом; в – с неравномерным угловым шагом, после корректировки

В первом случае (см. рис. 2, а) положение зубьев определялось как

$$\theta_1 = 0, \theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta, \ldots, \theta_Z = \theta_{Z-1} + \Delta\theta \quad (1)$$

или в общем виде

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta\theta = \sum_{i=1}^{k-1} \Delta\theta, \quad (2)$$

где Δθ – угловой шаг;

$$\Delta\theta = 2\pi / Z, \quad (3)$$

Z – количество зубьев.

Данный вариант фрез имеет существенный недостаток, связанный с непостоянством погрешности формообразования вдоль обработанного профиля вала (рис. 3).

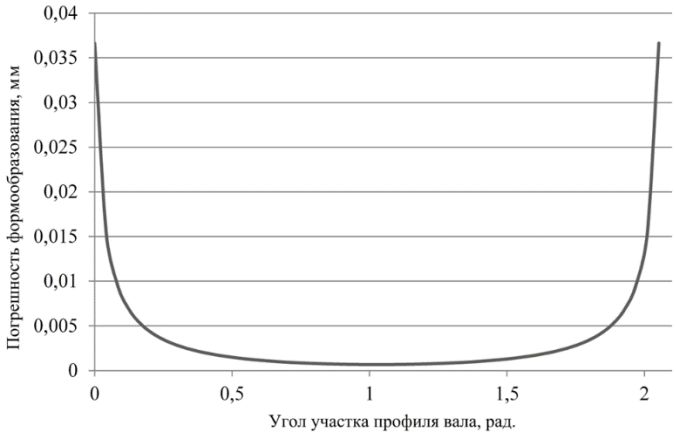


Рис. 3. Изменение величины погрешности формообразования вдоль профиля вала при расположении зубьев с постоянным угловым шагом

Из рис. 3 следует, что величина погрешности формообразования не равномерна вдоль профиля вала и принимает наибольшие значения на участках профиля, соответствующих впадинам вала, и минимальные значения, соответствующие вершинам РК-профиля. Величина погрешности формообразования в процентном отношении изменяется в пределах 99 %.

Для решения данной проблемы предполагалось применение схемы расположения зубьев с переменным (не равномерным) шагом расположения зубьев (см. рис. 2, б). Угловое положение для каждого зуба на начальном этапе предполагается определять следующим образом

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta\theta\left(\theta_{k-1}, \delta_{\text{тр.}}\right), \tag{4}$$

где θ_k – угловое положение текущего зуба; θ_{k-1} – угловое положение предыдущего зуба (k-1–го); $\delta_{\text{тр.}}$ – требуемая величина погрешности формообразования; $\Delta\theta(\theta_{k-1}, \delta_{\text{тр.}})$ – функция расчета величины углового шага для k-го зуба охватывающей фрезы, по известному угловому положения (k-1)-го зуба и заданной величины погрешности формообразования Δ [9, 10, 15].

Принимая для первого зуба $\theta_1 = 0$ из (4) определяется угловое положение второго зуба θ_2, далее для третьего и так далее, до тех пор, пока угловое положение последнего (текущего) зуба θ_k примет значение ≥2π. Тогда данный процесс прекращается, а полученные угловые положения зубьев, на втором этапе, корректируется (см. рис. 2, в), с целью обеспечения условия, чтобы угловое положение последнего зуба было равным 2π, по формуле

$$\theta_i = \theta_i \frac{2\pi}{\theta_k} \tag{5}$$

и число зубьев фрезы принимается равным $Z = k - 1$. На рис. 4 показан результат расчета погрешности формообразования при $\delta_{\text{тр.}}$=20 мкм при определении положения зубьев данным способом для фрезы с величиной среднего радиуса $R_f = 100$ мм и размерами вала $R = 20$ мм и $e = 2{,}8$ мм.

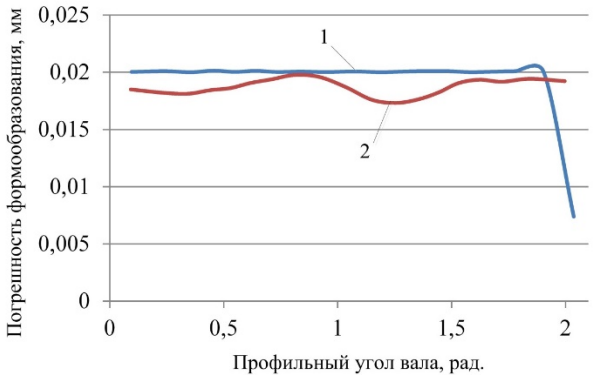


Рис. 4. Погрешность формообразования при не равномерном расположении зубьев: 1 – до корректировки; 2 – после корректировки

Расчеты показали, что величина погрешности формообразования до корректировки положения зубьев в процентном отношении изменяется в пределах 63 % (рис. 4, линия 1), что примерно в 1,57 меньше чем при равномерном распределении зубьев. Величина в 63 % формируется за счет последнего зуба, в виду того, что величина углового положения для последнего зуда θ_k, рассчитанное по формуле (4) принимает значение больше чем 2π. Корректировка положения зубьев позволяет величину изменения погрешности формообразования в процентном отношении уменьшить до 12 % (рис. 4, линия 2).

С помощью программного обеспечения был выполнен расчет числа зубьев, как при равномерном распределении зубьев, так и при не равномерном распределении зубьев, необходимого для обеспечения заданной погрешности формообразования соответствующей различным квалитетам точности (табл. 1).

Таблица 1

Числа зубьев охватывающих фрез, соответствующие различным квалитетам точности

R_f, мм	IT8		IT9		IT10		IT11		IT12	
	а)	б)	а)	б)	а)	б)	а)	б)	а)	б)
R=6,5, мм										
25	28	17	22	15	17	12	13	10	10	8
50	24	19	18	16	14	13	11	10	9	8
100	20	20	16	16	12	13	10	10	7	9
R=20, мм										
50	49	19	38	15	30	12	23	10	18	8
100	42	25	32	20	25	16	20	13	15	10
150	38	27	30	21	23	17	18	14	14	11
200	36	28	28	22	22	18	17	14	13	11
R=40, мм										
100	70	21	54	17	42	14	32	12	25	9
150	63	27	49	22	38	17	29	15	23	11
200	59	30	46	24	35	19	28	16	22	12
R=100, мм										
300	93	31	72	25	56	20	44	16	33	12
400	87	36	67	29	52	23	41	18	31	14

В табл. 1 приняты следующие обозначения колонок: а) для равномерного распределения зубьев; б) для не равномерного распределения зубьев. На рис. 5 показан график изменения числа зубьев для охватывающей фрезы с величиной среднего радиуса $R_f = 100$ мм и размерами вала $R = 20$ мм и $e = 2{,}8$ мм для различных квалитетов точности при различных схемах расположения зубьев.

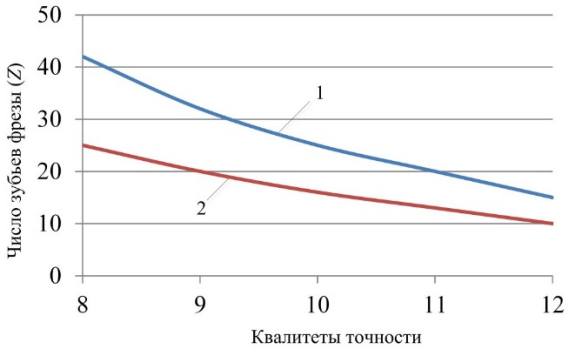


Рис. 5. Изменение числа зубьев фрезы: 1 – при равномерном распределении зубьев; 2 – при не равномерном распределении

Из рисунка следует, что неравномерное распределение зубьев по диаметру фрезы позволяет уменьшить количество зубьев и общая оценка полученных результатов (см. табл. 1) показала, что количество зубьев снижается в среднем на 39 %.

Величина неравномерности погрешности формообразования может быть еще больше снижена, за счет применения схемы симметричного расположения зубьев с неравномерным шагом. Данная схема может быть реализована путем решения относительно величины средней погрешности формообразования $\bar{\delta}$ и при заданном числе зубьев фрезы Z уравнения

$$\sum_{k=2}^{Z/2+1} \Delta\theta_k(\theta_{k-1}, \bar{\delta}) = \pi, \tag{6}$$

где $\Delta\theta_k(\theta_{k-1}, \bar{\delta})$ – функция, входящая в формулу (4).

Таким образом, выполняется расчет угловых положений зубьев на половине профиля фрезы, а угловые положения зубьев, расположенных на второй половине профиля, для обеспечения симметричности, определяются, как

$$\theta_i = 2\pi - \theta_{Z-i+2}, \tag{7}$$

где $i = \overline{Z/2+2, \ldots, Z}$.

В табл. 2 представлены результаты расчета величины погрешности формообразования для различных величин среднего радиуса обрабатываемого вала и охватывающей фрезы и заданном числе зубьев при симметричном расположении зубьев с неравномерным шагом.

Таблица 2

Рассчитанные величины погрешности формообразования при заданном числе зубьев и симметричном расположении зубьев, мкм

R_f, мм	Z				
	10	14	20	30	40
R=6,5 мм, *e*=0,4 мм					
25	20,6	10,5	5,1	2,3	1,3
50	28	13,9	6,9	3,4	1,7
100	31	15,8	7,8	3,5	1,8
R=20 мм, *e*=1,4 мм					
50	40,5	20,9	12,5	4,5	2,6
100	72	36,3	17,5	7,9	4,5
R=40 мм, *e*=6,8 мм					
100	69,2	35,4	17,3	7,7	4,8
150	177	79	35	14,4	7,9
200	136,5	69,5	34,1	15,1	9,4

На рис 6 показан график изменения погрешности формообразования вдоль профиля обрабатываемого вала при симметричном расположении зубьев с неравномерным шагом, где величина погрешности формообразования в процентном отношении изменяется в пределах 0,42 %.

Обработка полученных результатов (см. табл. 2) позволила установить следующую регрессионную зависимость для погрешности формообразования (с коэффициентом детерминации равным 98,08 %):

$$\delta = 153{,}42 \frac{R^{0{,}518} R_f^{0{,}489}}{Z^{2{,}016}}, \text{ мкм.} \tag{8}$$

На основе данной зависимости можно определить число зубьев фрезы при заданных значениях среднего радиуса обрабатываемого вала и фрезы, обеспечивающее требуемую погрешность формообразования:

$$Z \geq 12{,}136 \frac{R^{0{,}257} Rf^{0{,}242}}{\delta^{0{,}496}}. \quad (9)$$

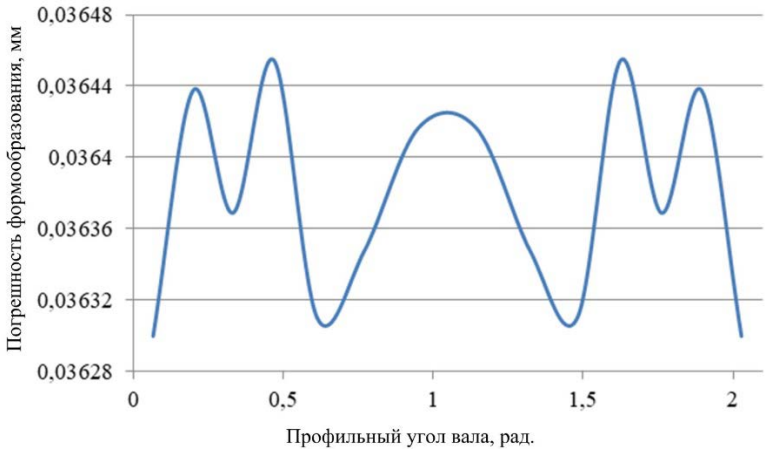


Рис. 6. Изменение погрешности формообразования при симметричном расположении зубьев с неравномерным шагом

Таким образом, угловые положения зубьев фрезы при условии их симметричного расположения с неравномерным шагом можно определить в следующей последовательности

1. Для заданной величины погрешности формообразования по формуле (9) рассчитаем число зубьев охватывающей фрезы. Полученное число необходимо округлить в большую сторону до целого числа.
2. На основе (8) определяем величину средней погрешности формообразования.
3. Выполняем расчет угловых положений зубьев на половине профиля фрезы по формуле (6).
4. Выполняем расчет угловых положений зубьев, расположенных на второй половине профиля по формуле (7), обеспечивая тем самым их симметричное, относительно первой половины, расположение.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Применение схемы расположения зубьев охватывающей фрезы с равным угловым шагом приводит к неравномерности величины погрешности формообразования вдоль профиля вала (до 99 %).
2. Использование схемы расположения режущих зубьев охватывающей фрезы с неравномерным расположением и последующей их корректировкой характеризуется более равномерным распределением погрешности формообразования вдоль профиля обрабатываемого вала (изменение составляет не более 12 %).
3. По результатам компьютерного моделирования были установлены числа зубьев, при равномерном распределении и не равномерном распределении зубьев, необходимые для обеспечения заданной погрешности формообразования, соответствующей различным квалитетам точности. Сравнение показало, что применение схемы с неравномерным расположением позволяет снизить количество зубьев в среднем на 39 %.
4. Для снижения величины неравномерности погрешности формообразования авторами была предложена схема с симметричным расположением зубьев и неравномерным угловым шагом. Применение данной схемы позволило обеспечить изменение величины погрешности формообразования вдоль профиля обрабатываемого вала в процентном отношении в пределах 0,42 %.
5. По результатам компьютерного моделирования были установлены величины средней погрешности формообразования, соответствующие заданным величинам среднего радиуса обрабатываемого вала и охватывающей фрезы и числу зубьев при их симметричном расположении с неравномерным шагом. Обработка полученных значений позволила установить советующие регрессионные уравнения, как для средней погрешности формообразования, так и для минимального числа зубьев охватывающей фрезы. Была предложена последовательность расчета угловых положений зубьев фрезы при условии их симметричного расположения с неравномерным шагом.

Список литературы

1. Чарнко Д.В., Тимченко А.И. Профильные соединения валов и втулок в машиностроении // Вестник машиностроения. 1981. № 1. С. 33-37.
2. Рожкова Е.А. Математическое моделирование деталей РК-3 профильного соединения с натягом // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 1. С. 427-431.
3. Полторацкий С.Г. Гранные отверстия в профильных моментопередающих соединениях // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Матер. междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22-23 апреля 2021 года / под ред. М.Е. Лустенкова. Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2021. С. 66-67.
4. Рожкова Е.А. Теория и методы проектирования профильных неподвижных неразборных соединений с равноосным контуром с натягом: дис. … канд. техн. наук. Чита, 2014. 182 с.
5. Рожкова Е.А. Выбор конструктивных параметров РК-3 профильных соединений для различных условий эксплуатации // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1(21). С. 45-50.
6. Ziaei M. Bending and Torsional Stress Factors in Hypotrochoidal H-Profiled Shafts Standardised According to DIN 3689-1 // Eng. 2023. V. 4. P. 829-842. DOI: 10.3390/eng4010050.
7. Тимченко А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: автореф. дис. … д-ра техн. наук. Москва, 1993. 41 с.

8. Шитиков А.Н. Обеспечение качества изготовления РК-профильных валов методом фасонного фрезерования. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2015. 126 с.

9. Куц В.В., Пономарев В.В. Метод определения положения зубьев сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 81-85.

10. Пономарев В.В. Разработка методики проектирования фрез-протяжек для обработки РК-профильных валов: дис. … канд. техн. наук. Курск, 2023. 115 с.

11. Куц В.В., Максименко Ю.А. Структурный синтез специализированных металлорежущих систем для обработки РК-профильных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 6(45). С. 65-70.

12. А.с. 1668118 СССР. Хон для обработки отверстий с равноосным контуром / С.Н. Лапин, А.И. Тимченко. Опубл. 07.08.1991. Бюл. № 29.

13. Тимченко А.И., Лапин Н.С., Шухарев Е.А. Фрезерование РК-профильных отверстий на станках с числовым программным управлением // Вестник машиностроения. 1990. № 6. С. 37-40.

14. Тимченко А.И., Шухарев Е.А. Особенности управления некоторыми показателями качества протяжек для обработки РК-профильных отверстий // Вестник машиностроения. 1991. № 1. С. 62-64.

15. Метод определения положения зубьев фрезы с конструктивной радиальной подачей для обработки РК-профильных отверстий / В.В. Куц, М.В. Митрофанов, Ю.А. Мальнева, О.Н. Кириллов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 4. С. 115-121. DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.4.017.

16. Куц В.В., Разумов М.С., Митрофанов М.В. Моделирование фрезы с радиальной конструктивной подачей для обработки РК-профильных отверстий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 5. С. 82-93.

17. Моделирование производящих поверхностей охватывающих фрез с конструктивной радиальной подачей для обработки валов с равноосным контуром / В.В. Куц, М.А. Сидорова, М.С. Разумов, Ю.А. Мальнева // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 4(52). С. 146-150.

18. Определение положения зубьев охватывающей фрезы с радиальной конструктивной подачей для обработки РК-профильных валов / А.В. Исаев, В.В. Куц, М.С. Разумов [и др.] // Вестник МГТУ «Станкин». 2018. № 3(46). С. 112-115.

19. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами. Курск: Курский государственный технический университет, 1997. 391 с.

20. Tolmacheva T.A., Kuts V.V., Malneva Y.A. Improving Productivity of Misaligned Boring of Hydraulic Cylinder Holes with a Rotating Cutter Block Based on Computer Simulation Results // Key Engineering Materials. 2022. V. 910. P. 150-155.

Мальнева Юлия Андреевна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, yuliyamaximencko2010@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Куц Вадим Васильевич, д-р техн. наук, профессор, kuc-vadim@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Кальченко Андрей Николаевич, аспирант, kalchenko79@mail.ru, Россия, Курск, Юго-западный государственный университет,

Толмачева Татьяна Александровна, канд. техн. наук, старший преподаватель, tolmacheva-ta@mail.ru, Россия, Курск, Юго-западный государственный университет,

Урванцев Герман Владимирович, студент, molnia46rus@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет

INVESTIGATION OF THE ERROR IN THE SHAPING OF RC PROFILE SHAFTS BY AN ENVELOPING MILLING CUTTER WITH A RADIAL STRUCTURAL FEED

Y.A. Malneva, V.V. Kuts, A.N. Kalchenko, T.A. Tolmacheva, G.V. Urvantsev

The article is devoted to the study of the effect on the error of forming RC profile shafts of various tooth arrangements of the enclosing milling cutter. The schemes of arrangement with a uniform (constant) angular pitch and an uneven angular pitch were considered. The values of the numbers of teeth providing a given shaping error corresponding to various accuracy standards are established. A scheme and procedure for calculating angular positions with a symmetrical arrangement of teeth with uneven pitch are proposed.

Key words: shaping error, RC-profile shaft, uneven tooth pitch, embracing milling cutter.

Malneva Yulia Andreevna, candidate of technical sciences, docent, head of chair, yuliyamaximencko2010@yandex.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Kuts Vadim Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, kuc-vadim@yandex.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Kalchenko Andrey Nikolayevich, postgraduate, kalchenko79@mail.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Tolmacheva Tatiana Aleksandrovna, candidate of technical sciences, senior lecturer, tolmacheva-ta@mail.ru, Russia, Kursk, South-West State University,

Urvantsev German Vladimirovich, student, kalchenko79@mail.ru, Russia, Kursk, South-West State University

УДК 621.793
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-576-577

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИИ ДИФФУЗИОННОГО ЗАЩИТНОГО СЛОЯ НА ДЕТАЛЯХ ПРЕСС-ФОРМ

С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев, А.А. Калинин, В.В. Воинова

В статье рассмотрены особенности формирования диффузионного защитного слоя на деталях пресс-форм при диффузионной металлизации. Показано, что в структуре стальной матрицы образцов, отожженных в водороде, просматриваются крупные мартенситные иглы у поверхности, противоположной напыленной. Это говорит о том, что здесь также была повышенная скорость охлаждения, обеспечивающая закалку и образование мартенсита. В результате проведенных исследований установлено, что при диффузионной металлизации образцов с плазменнонапыленными покрытиями из порошков ПХ23Н28М3Д3Т и ПХ18Н9Т и последующего отжига в защитной атмосфере водорода диффузионный слой практически не образуется.

Ключевые слова: диффузионная металлизация, отжиг, упрочнение, пресс-форма.

Литье под давлением примечательно тем, что отливки формируются и твердеют при значительном давлении, достигающем нескольких сотен бар. Это обеспечивает отличную заполняемость даже самых сложных форм, высокие механические характеристики металла и точные размеры изделий, что делает ненужной дополнительную механическую обработку поверхности [1].

Тем не менее, формы, используемые для литья под давлением, особенно при производстве отливок из сплавов на основе железа и меди, испытывают экстремальные условия эксплуатации, что существенно сокращает их срок службы и способствует износу.

Жидкий металл содержит активные газы, такие как кислород и водород, которые могут вызывать коррозию рабочей поверхности формы. В совокупности с механическими напряжениями, это может привести к коррозионному растрескиванию и усталостному разрушению.

При контакте металла с формой под высоким давлением, происходят диффузионные процессы, насыщая поверхность компонентами металла, что способствует прилипанию отливок к стенкам формы и увеличивает напряжение в ее поверхностных слоях.

Когда жидкий металл заполняет форму со скоростью до 50 м/с и давлением до 2000 кг/см², возникает трение и гидродинамические удары, что приводит к эрозии материала формы. Также, значительные механические нагрузки возникают при удалении отливок из форм.

Поэтому материалы, из которых изготовлены пресс-формы для литья под давлением, должны обладать следующими характеристиками [2, 3]: устойчивостью к расплаву, высокой твердостью при нагреве, ударной вязкостью, устойчивостью к термическому удару, низким коэффициентом теплового расширения, хорошей ковкостью и обрабатываемостью, минимальной деформацией при термообработке.

Однако стоимость подобных материалов, сложность их изготовления и ограниченный срок службы делают необходимым поиск решений для повышения их долговечности.

Метод газотермического напыления является перспективным для упрочнения поверхностей, позволяя использовать различные порошковые материалы [4, 5]. Преимущество таких покрытий состоит в улучшении устойчивости материала к трещинообразованию, тем самым увеличивая срок службы пресс-форм до появления трещин [3]. Однако плазменные покрытия имеют недостатки, такие как высокая пористость и слабое сцепление с основой [4].

Таким образом исследование возможностей использования пресс-форм с защитными покрытиями, нанесенными газотермическим способом, в условиях значительных термомеханических нагрузок при литье различных металлов представляет научный и практический интерес.

1. Материалы и методы исследования

В качестве материала-основы для напыления защитных износостойких покрытий использовали инструментальную штамповую сталь марки 3Х2В8Ф, из которой вырезали образцы с размерами Ø50×10 мм. В качестве напыляемых материалов применяли следующие порошковые материалы: ПХМ, феррохром, ПХ18Н9Т, ПХ23Н28М3Д3Т.

При диффузионной металлизации на поверхность образцов плазменной горелкой наносили покрытия вышеуказанными порошками по следующей технологии: обезжиривание поверхности уйат-спиритом; дробеструйная обработка поверхности (для повышения качества сцепления покрытия с основой); плазменное напыление покрытия. Режимы плазменного напыления приведены в табл. 1.

После диффузионной металлизации образцы пресс-форм подвергались диффузионному отжигу в атмосфере камерной печи типа ОКБ-лабораторная и в защитной атмосфере водорода. После отжига образцы охлаждали на воздухе. Режимы диффузионного отжига приведены в табл. 2.

Исследование микротвердости проводили с использованием микротвердомера ПМТ-3, при нагрузке на индентор 50 г. Металлографические исследования проводили на металлографическом микроскопе МИМ-8. Выявление микроструктуры проводили в травителе следующего состава: 20 мл H_2O + 20 мл HCl + 4 г Cu_2SO_4.

2. Результаты и их обсуждение. Исследование процесса диффузионной металлизации, включающей в качестве исходной операции плазменное напыление покрытий ПХМ, феррохром, ПХ18Н9Т, ПХ23Н28М3Д3Т, и последующего отжига при 1200 °С в течение 2, 4 и 6 часов, позволило установить, что на рабочих поверхностях диффузионный слой не формируется . Металлографический анализ выявил, что ускоренное охлаждение после

нагрева и выдержке при 1200 °С привело к образованию в стали мартенсита (рис. 1), что указывает на несоблюдение режимов отжига.

Таблица 1

Режимы плазменного напыления

Материал покрытия	Толщина покрытия, мм	Напряжение, В	Сила тока, А	Расстояние от среза сопла до изделия, мм	Плазмообразующий газ	Транспортирующий газ	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Расход транспортирующего газа, л/мин	Расход порошка, кг/час	Размер фракции, мкм
ПХМ	0,3	50…60	300…350	100…120	Ar	N_2	35…40	6…9	1,0…1,2	40…120
Феррохром	0,3	50…60	300…350	100…120	Ar	N_2	35…40	6…9	1,0…1,2	40…120
ПХ23Н28М3Д3Т	0,3	45…50	350	100…120	Ar	N_2	35…40	6…9	1,0…1,2	40…120
ПХ18Н9Т	0,3	45…50	350	100…130	Ar	N_2	35…40	6…9	1,0…1,2	40…120

Таблица 2

Режимы диффузионного отжига

Материал покрытия	Толщина покрытия, мм	Атмосфера отжига	Температура, °С	Время, час
ПХМ; феррохром	0,2…0,3	печная защитная	1200	2; 4; 6
	0,2…0,3	печная защитная	1200	2; 4; 6
ПХ23Н28М3Д3Т	0,2…0,3	печная защитная	1200	2; 4; 6
ПХ18Н9Т	0,2…0,3	печная защитная	1200	2; 4; 6

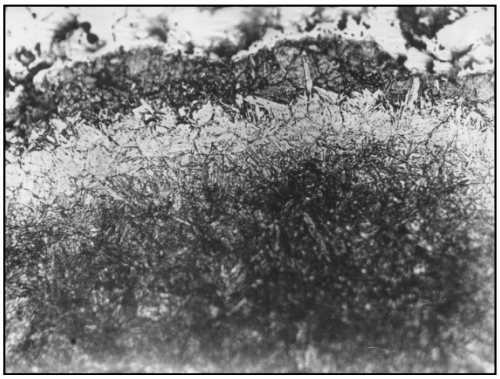


Рис. 1. Иглы мартенсита в стали у поверхности образца после печного отжига при температуре 1200 °С в течение 6 часов, ×800

При напылении хромовых и феррохромовых покрытий и последующем отжиге в атмосфере водорода при 1200 °С наблюдали образование диффузионного слоя. Особенно равномерное распространение слоя (глубиной 200-217 мкм) зарегистрировано в образцах с феррохромом, после шестичасового отжига (рис. 2). Хромовые покрытия имеют столбчатую структуру глубиной 50-100 мкм, но с значительной неравномерностью (рис. 3). Покрытие, сохранившееся только на отдельных участках – пористое, имеются газовые раковины и окисные пленки.

Микротвердость диффузионных слоев характеризуется значениями порядка 1300-1600 МПа, что ниже микротвердости (3000 МПа) матрицы основного металла (рис. 4 и 5). Это может быть связано с обеднением углеродом поверхности при хромировании изделий малого сечения, вместо образования карбидного слоя. При отжиге в водороде в матрице основного металла образуются иглы мартенсита у поверхности, противоположной покрытию, из-за быстрого охлаждения. Исследования подтвердили, что с покрытиями из ПХ23Н28М3Д3Т и ПХ18Н9Т диффузионный слой практически отсутствует. На поверхности изделий с небольшой массой, несмотря на высокий процент содержания углерода в стали, после хромирования часто образуется структура, состоящая преимущественно из твердого раствора.

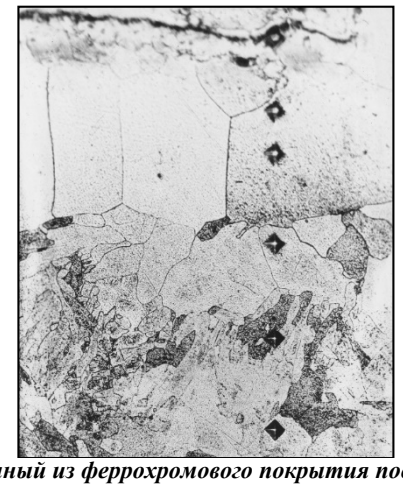


Рис. 2. Диффузионный слой, полученный из феррохромового покрытия после защитного отжига в атмосфере водорода при температуре 1200 °С в течение 6 часов, ×200

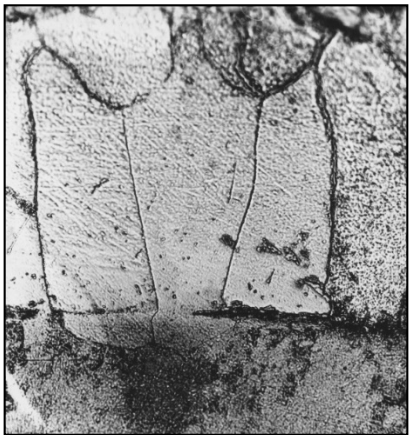


Рис. 3. Диффузионный слой, полученный из покрытия хромом после защитного отжига в атмосфере водорода при температуре 1200 °С в течение 6 часов, ×200

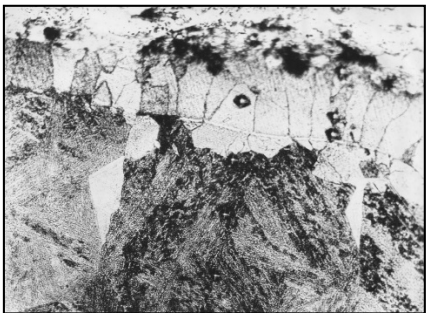


Рис. 4. Структура хромированного покрытия после защитного отжига в атмосфере водорода при температуре 1200 °С в течение 6 часов, ×200

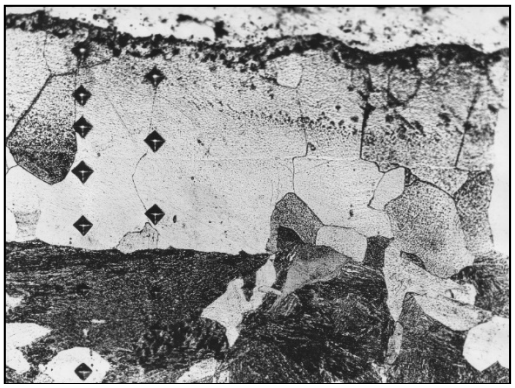


Рис. 5. Структура феррохромового покрытия после защитного отжига в атмосфере водорода при температуре 1200 °С в течение 6 часов, ×200

В структуре стальной матрицы образцов, отожженных в водороде, просматриваются крупные мартенситные иглы у поверхности, противоположной напыленной. Это говорит о том, что здесь также была повышенная скорость охлаждения, обеспечивающая закалку и образование мартенсита. В результате проведенных исследований установлено, что при диффузионной металлизации образцов с плазменнонапыленными покрытиями из порошков ПХ23Н28М3Д3Т и ПХ18Н9Т и последующего отжига в защитной атмосфере водорода диффузионный слой практически не образуется.

Заключение. Способ диффузионного хромирования, связанный с образованием плазменнонапыленных покрытий, включает в себя нанесение плазменным методом слоя металлического покрытия, содержащего хром, на стальную поверхность и последующий диффузионный отжиг.

Установлено, что метод насыщения оказывает существенное влияние на начальные условия, предшествующие процесса диффузии. Показано, что качество нанесенного покрытия влияет на исходные условия для диффузии, скорость формирования слоя, его структуру и характеристики после отжига. Для получения качественного диффузионного слоя в производстве рекомендуется следующее:

1. Использовать порошковые покрытия из ПХМ и феррохрома.
2. Следить за размером частиц материала; мелкие частицы (40-60 мкм) предпочительны.
3. Применять газообразный аргон высшего качества для охлаждения при напылении, чтобы избежать окисления порошка. Толщина покрытия не должна превышать 200 мкм.
4. Проводить отжиг в защитной водородной атмосфере при 1200 ℃ в течение 6 часов с охлаждением в печи.

Полученные результаты могут быть использованы при установлении закономерностей поведения слитковых, порошковых и композиционных материалов различной природы с высокой дисперсностью фазовых и структурных составляющих в различных условиях и состояниях [6-12].

Список литературы

1. Моргунов В.Н. Основы конструирования отливок. Параметры точности и припуски на механическую обработку: учебное пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. 164 с.
2. Беккер М.Б. Литье под давлением: учебник для подготовки рабочих на производстве. 3-е изд., перераб и доп. М.: Высшая школа, 1978. 213 с.
3. Гавариев Р.В., Савин И.А., Леушин И.О. К вопросу о повышении эксплуатационных показателей пресс-форм для литья под давлением нанесением многофункциональных покрытий // Литейное производство. 2014. № 1(14). С. 58-61.
4. Физико-механические и эксплуатационные свойства защитных покрытий / В.К. Зеленко, Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, В.М. Власов. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 1999. 213 с.
5. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.
6. Применение технологии изготовления «корковым» способом формообразующих вставок для литья под давлением медных сплавов / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 3(78). С. 67-83.
7. Влияние процесса оплавления на когезионную прочность порошковых плазменных покрытий / Н. Н. Сергеев, М. В. Ушаков, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, С. Н. Кутепов, О. В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 2. С. 430-441.
8. Закономерности формирования структуры частиц порошковых композиций на основе алюминия, получаемых механическим реакционным легированием / В. Н. Гадалов, А. Е. Гвоздев, А. Г. Колмаков, И. В. Ворначева, С. Н. Кутепов, Е. А. Ельников, Д. С. Алымов, Д. И. Нестеров // Материаловедение. 2019. № 7. С. 38-42.
9. Увеличение износостойкости пористых газотермических покрытий путем химико-термической обработки / С. Г. Чулкин, А. Д. Бреки, А. А. Шатульский, А. Е. Гвоздев, С. Н. Кутепов, Е. В. Агеев // Вестник «Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева». 2020. № 1(52). С. 71-77.
10. О формировании диффузионного защитного слоя на деталях пресс-форм / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12. № 1. С. 25-40.
11. Использование защитных износостойких покрытий для повышения долговечности литейных пресс-форм / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, А. Е. Гвоздев, И. В. Минаев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12. № 2. С. 8-25.
12. Влияние наплавленного защитного слоя на упругие и неупругие характеристики материала основы / М. В. Ушаков, С. Н. Кутепов, Д. С. Клементьев, А. А. Калинин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 453-461.

Кутепов Сергей Николаевич, канд. пед. наук., доцент, kutepov.sergei@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Клементьев Денис Сергеевич, аспирант, denis.klementev.93@mail.ru, Россия, Тула, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»,

Калинин Антон Алексеевич, заместитель директора по коммерческим вопросам издательства ТулГУ, antony-ak@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Воинова Валерия Владленовна, студент, voinovalerya26@gmail.com, Россия, Тула, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»

FEATURES OF THE FORMATION OF DIFFUSION PROTECTIVE LAYER ON MOLD PARTS

S.N. Kutepov, D.S. Klement'yev, A.A. Kalinin, V.V. Voinova

The article discusses the features of the formation of a diffusion protective layer on mold parts during diffusion metallization. It is shown that in the structure of the steel matrix of samples annealed in hydrogen, large martensitic needles are visible at the surface opposite to the sprayed one. This suggests that there was also an increased cooling rate, providing quenching and formation of martensite. As a result of the conducted studies, it was found that during the diffusion metallization of samples with plasma-dusted coatings of PKh23N28M3D3T and PKh18N9T powders and subsequent annealing in a protective hydrogen atmosphere, a diffusion layer is practically not formed.

Key words: diffusion metallization, annealing, hardening, mold.

Kutepov Sergey Nikolaevich, candidate of pedagogical science, assistant professor, kutepov.sergei@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Klement'yev Denis Sergeevich, postgraduate, denis.klementev.93@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Kalinin Anton Alekseevich, deputy director for commercial affairs of TulSU Publishing House, antony-ak@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Voinova Valeria Vladlenovna, student, voinovalerya26@gmail.com, Tula, Russia, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-581-582

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ БУРОВЫХ ПЛАТФОРМ

К.С. Димитров, Л.Н. Козаченко, И.В. Антипенко, Т.С. Медведева

В статье рассматриваются вопросы повышения надежности функционирования электрических систем буровых платформ. Освещаются наиболее распространенные проблемы, связанные с электроснабжением платформ, такие как перебои в электропитании, перегрузки. Анализируются методы повышения надежности, включая резервирование оборудования, использование интеллектуальных систем управления, применение предиктивной аналитики и внедрение систем мониторинга. Рассматриваются преимущества и недостатки каждого из методов.

Ключевые слова: буровые платформы, стабильность, надежность, энергетика, морской.

Введение. Буровая платформа — это сооружение, используемое для бурения скважин в морских условиях. Буровые платформы бывают разных типов, но все они имеют общие компоненты и функции. Основными компонентами буровой платформы являются корпус, надстройка, буровая вышка, буровое долото, бурильная колонна, буровой раствор, система позиционирования.

Буровые платформы играют важную роль в мировой энергетической промышленности, обеспечивая значительную часть добываемой нефти и газа. В Российской Федерации ведется активная разработка шельфовых месторождений нефти и газа. Для добычи нефти и газа на море используются морские буровые установки различных типов. К ним относятся буровые баржи, плавучие буровые установки, погружные буровые установки, полупогружные буровые установки, буровые суда [1-3].

Существуют следующие типы буровых установок: самоподъемная плавучая буровая установка, погружная буровая установка, полупогружные буровые установки, буровые суда.

Каждый из этих типов буровых платформ рассчитан на определенную глубину и под определенные условия бурения.

Буровые платформы представляют собой сложные инженерные сооружения, с множеством систем, осуществляющих производство и распределение энергии, добычу полезных ископаемых, хранение и отгрузку.

Постановка проблемы. В состав электроэнергетической системы входят: первичный двигатель (1), соединенный с синхронными генераторами переменного тока (2), подключенными через измерительные блоки (3), с датчиками тока (15) и напряжения (16) к главному распределительному щиту (4), к которому подключен электрический водоподогреватель опреснительной установки (11) через регулятор мощности водоподогревателя (6) , а также общий активный выпрямитель (5), на основе транзисторных ключей (12), содержащий параллельно включенные IGBT - транзистор (13) и диод (14), к которому подключены электроприводы переменного тока бурового насоса (8), электроприводы переменного тока роторного стола (9) и электроприводы переменного тока спуско-подъемных (10) механизмов с помощью автономных инверторов напряжения (7). (рис. 2).

Наиболее распространенными проблемами, связанные с электроснабжением буровых платформ являются: перебои в электропитании (могут быть вызваны неисправностями оборудования, ошибками операторов, внешними факторами (например, ударами молнии или экстремальными погодными условиями) и кибератаками); перегрузки (возникают, когда потребление электроэнергии превышает номинальную мощность электрооборудования); короткие замыкания (происходят, когда ток проходит по непредназначенному пути с низким сопротивлением); повреждение кабелей (могут быть вызваны механическими воздействиями (например, прокладкой кабелей вблизи движущихся частей), воздействием окружающей среды (например, коррозией или грызунами) или неисправностями оборудования); неисправности генераторов (генераторы являются основным источником электроэнергии на буровых платформах. Их неисправности могут привести к перебоям в электропитании или нестабильному напряжению); неисправности систем управления (системы управления электроснабжением контролируют и защищают оборудование. Их неисправности могут привести к неконтролируемым перегрузкам или коротким замыканиям); старение оборудования (по мере старения электрооборудования повышается риск его отказов и неисправностей); недостаточное техническое обслуживание (отсутствие надлежащего технического обслуживания может привести к преждевременному выходу из строя оборудования и повышению риска проблем с электроснабжением.

Современные буровые платформы состоят из двух групп агрегатов:

1) Технологический комплекс – функция которого состоит в бурение скважин и извлечении полезных ископаемых.

2) Система позиционирования – функция которой состоит в том, что бы не дать буровой платформе сойти с позиции при бурении скважины.

Технологический комплекс современной буровой платформы, обеспечивающий процесс добычи углеводородов, представляет собой группу механизмов со своим индивидуальным приводом, режимы работы которых взаимосвязаны между собой и оказывают в процессе эксплуатации влияние друг на друга, как напрямую, так и опосредованно.

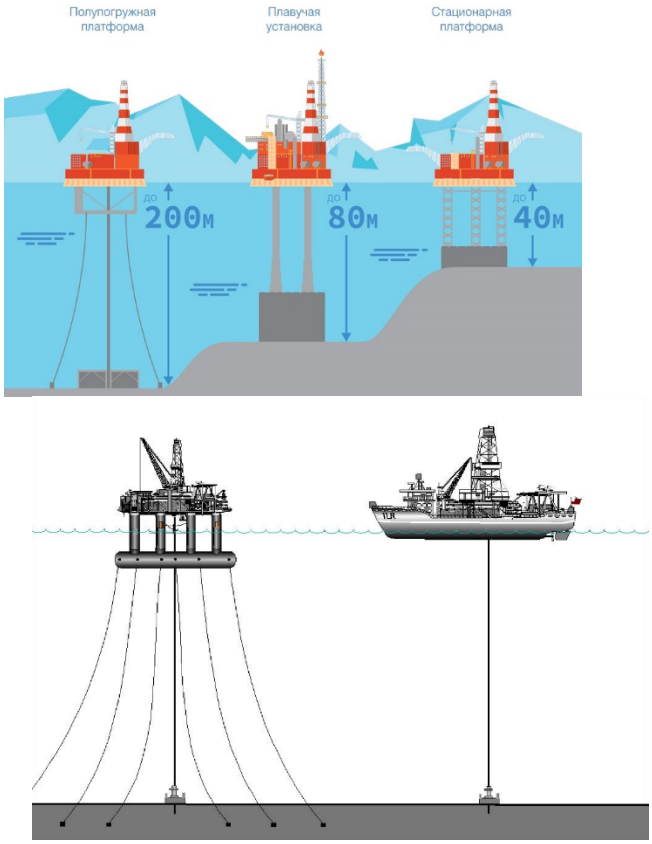


Рис 1. На рисунках изображены: стационарная буровая платформа, плавучая буровая платформа, полупогруженная буровая платформа и самоходная буровая установка (буровое судно)

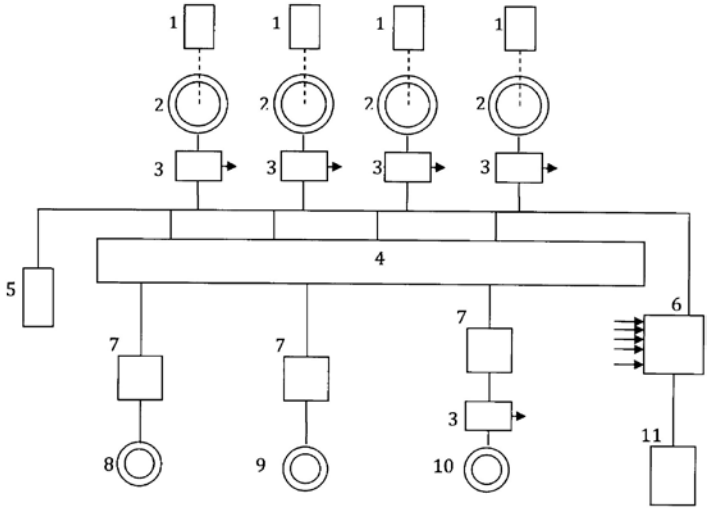


Рис. 2. Структурная схема электроэнергетической системы морской буровой платформы

Электротехнический комплекс обеспечивает полноценную и безаварийную работу буровой платформы или установки [4-7]. Структурная схема электротехнического комплекса представлена на рис. 3.

Материалы и методы. При применении частотных критериев и матричных методов не требуется определять коэффициенты характеристического уравнения, что делает их эффективными при анализе устойчивости сложных СЭЭС. Но кривые *D*-разбиения при исследовании сложных СЭЭС имеют резонансные области в некоторых достаточно узких диапазонах частот, для выявления которых необходимо выполнять расчеты с малым шагом изменения частоты и последующим его дроблением [3]. Частотный критерий Михайлова эффективен лишь в тех случаях, когда характеристический определитель исследуемой СЭЭС является гурвицевым; в частности, он не пригоден для анализа устойчивости консервативных систем [2].

Поэтому становится оправданным поиск новых подходов к анализу статической устойчивости сложных СЭЭС, которые избавили бы от алгоритмических трудностей, свойственных алгебраическим критериям, и в то же время характеризовались обозримостью алгебраических выражений, используемых для анализа статической устойчивости СЭЭС. В данной работе в основу такого подхода предлагается положить энергетические соотношения для сложной СЭЭС, законы механики и признанное классическим определение понятия устойчивости движения, данное А. М. Ляпуновым.

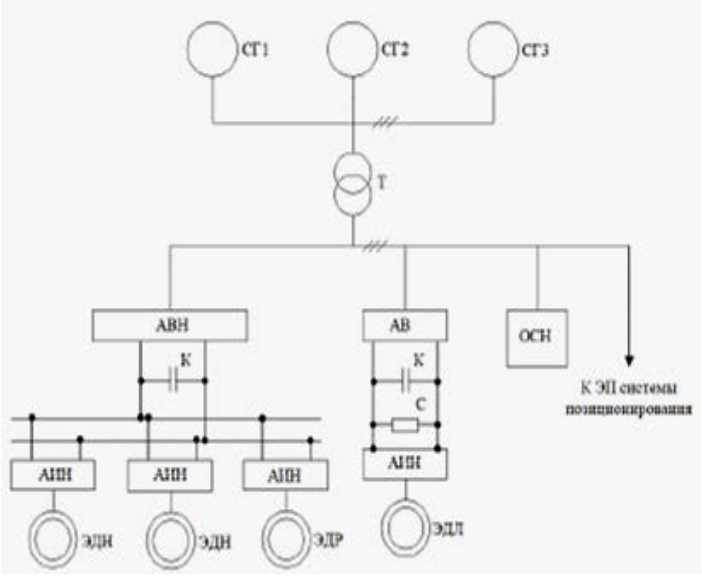


Рис. 3. Структурная схема электротехнического комплекса морской буровой платформы: СГ1,2,3 — синхронные генераторы; Т — трансформатор; АВН — активный выпрямитель; К — конденсатор; С — тормозное сопротивление; АИН — автономный инвертор напряжения; ОСН — общесудовая нагрузка; ЭДН — электродвигатели буровых насосов; ЭДР — электродвигатель ротора; ЭДЛ — электродвигатель буровой лебедки

Энергетическая интерпретация при формировании критериев устойчивости. Рассмотрим многомашинную СЭЭС, описываемую системой дифференциальных уравнений (i= 1, 2, ..., n),

$$T_{yi}d^2\delta_i/dt^2 = P_{\text{т}i} - P_{\text{эл}\,i}, \tag{1}$$

где электромагнитные мощности $P_{\text{эл}\,i}$ вычисляются в предположении, что ЭДС генераторов (синхронных машин) и параметры схемы замещения СЭЭС постоянные (действие АРВ учтено упрощенно, полагая $E_i = E_i'$, и под углом δ подразумевается δ' [1])

$$P_{\text{эл}\,i} = E_i^2 y_{ii}\sin\alpha_{ii} + \sum_{i\neq j}^{n}\left[E_i E_j \sin\left(\delta_{ij} - \alpha_{ij}\right) + P_{dij}\omega_{ij}\right]. \tag{2}$$

Получаемую на основе (1) и (2) систему дифференциальных уравнений возмущенного движения приведем к матричному уравнению

$$D\ddot{x} + B\dot{x} + Cx = R(x) \tag{3}$$

где x – матрица-столбец с переменными (отклонениями) x_i, ... x_n; $\dot{x}$ и $\ddot{x}$ – соответственно первая и вторая производные матрицы x; D, B и C – квадратные матрицы порядка п с постоянными коэффициентами, причем матрица D симметричная (D=D'); $R(x)$ –матрица с элементами, зависящими от отклонений в степени выше первой. Если положить $R(x)$ = 0, то (3) превращается в уравнение первого приближения, на основе которого и решается вопрос об устойчивости движения.

В механике для поиска устойчивости консервативной системы (C симметрична) применяется теорема Лагранжа-Дирихле [2], согласно которой потенциальная энергия системы $W_n(x)$ в положении ее устойчивого равновесия должна быть определенно-положительной, иметь строгий изолированный минимум $W_n(x) = min$. Для строго диссипативной системы (матрицы C и B симметричны) необходимо еще, чтобы с течением времени t полная механическая энергия системы $W_n(\dot{x}\,, x)$ убывала $dW_n(\dot{x}\,, x)dt < 0$.

По определению понятия устойчивости, данному Ляпуновым, система считается устойчивой и в том случае, если не обеспечивается затухание колебаний x_i и не происходит их нарастание [5,8]. С учетом этого и того, что потенциальная энергия $W_n(x)$ не зависит от производных $\dot{x}_i$, а кинетическая $W_{\text{к}}(\dot{x})$ является определенно-положительной квадратичной функцией переменных $\dot{x}$, приведенные условия запишем как

$$W_M(\dot{x}, x) = min; \quad -dW_M(\dot{x}, x)/dt \geqslant 0 \tag{4}$$

Уточним (4) применительно к общему случаю, когда СЭЭС содержит неконсервативные силы (матрица С несимметрична). И здесь, так как матрица D симметрична, квадратичная форма $W_K(\dot{x}) = 0{,}5D\dot{x}\dot{x}$ определенно-положительна и выражает собой кинетическую энергию системы.

Положим, что матрица B симметрична. Разобьем C на две матрицы: симметричную C_c и кососимметричную A:

$$C_c = C_c' = 0{,}5(C + C'); A = -A' = 0{,}5(C - C') \tag{5}$$

где C' – транспонированная матрица C.

С учетом этого при $R(x)$ =0 уравнение (3) примет вид

$$D\ddot{x} + B\dot{x} + Cx + Ax = 0. \tag{6}$$

Скалярно умножим все члены (6) на матрицу-столбец производных х и преобразуем (6)

$$-d\left(0{,}5D\ddot{x}\dot{x}+0{,}5Cxx-\int_{t_0}^{t}A\dot{x}\dot{x}dt\right)/dt=B\ddot{x}\dot{x}+2A\dot{x}\dot{x} \quad (7)$$

Квадратичная форма второго слагаемого левой части (7) представляет собой потенциальную энергию системы

$$W_{\Pi}(x)=0{,}5Cxx.$$

Криволинейный интеграл

$$\int_{t_0}^{t}A\dot{x}\dot{x}dt=\sum_{i>i}^{n}a_{ij}\left(\int_0^{x_i}x_jdx_i-\int_0^{x_j}x_idx_j\right),$$

где a_{ij} - элементы матрицы A, представляет собой работу неконсервативных сил Ax вдоль пути между произвольной точкой пространства с координатами x для момента времени t_0 и точкой 0 начала координат (точкой равновесного состояния системы), в которую переходит изображающая точка в момент времени t.

С введением неконсервативных сил ($A\neq 0$) изменяется и пространственное положение точки 0, являющейся изолированным минимумом потенциальной энергии. Более того, под действием неконсервативных сил уменьшается и полная механическая энергия системы

$$W(\dot{x},x)=W_{\text{М}}(\dot{x},x)-\int_{i_0}^{t}A\dot{x}\dot{x}dt.$$

С учетом этого (7) принимает вид

$$-dW(\dot{x},x)/dt=B\dot{x}\dot{x}+2A\dot{x}\dot{x} \quad (8)$$

где «приведенная энергия» системы (интеграл-функция)

$$W(\dot{x},x)=0{,}5(D\dot{x}\dot{x}+C_cxx)-\sum_{j>i}^{n}a_{ij}\left(\int_0^{x_i,x_j}x_jdx_i-x_idx_j\right) \quad (9)$$

Функции, определяемые криволинейным интегралом вида$\int xdy-ydx$, как и билинейные функции [4,9-12], имеют квадратичную форму.

Для анализа устойчивости системы в соответствии с (8) необходимо установить, являются ли выражения (8) и (9) определенно-положительными функциями переменных x и их производных $\dot{x}$. Для этого воспользуемся критерием Сильвестра [4], согласно которому в случае квадратичной формы функции $Z(\dot{x},x)$ необходимым и достаточным условием ее определенной положительности будет положительность всех главных диагональных миноров $\Delta_1,\Delta_2,\dots,\Delta_n$ матрицы Сильвестра из коэффициентов, вычисляемых как вторые частные производные по x и $\dot{x}$:

$$\Delta_1>0,\Delta_2>0,\dots,\Delta_n>0. \quad (10)$$

Условия (10) достаточны, если в (3) принято $R(x)=0$. Матрицы Сильвестра $\Delta(D,C)$ и $\Delta(B,A)$, получаемые применительно к выражениям $W(\dot{x},x)$ и $B\dot{x}\dot{x}+2A\dot{x}\dot{x}$, имеют вид:

$$\Delta(D,C)=\begin{bmatrix}D & 0\\ 0 & C\end{bmatrix};\Delta(B,A)=\begin{bmatrix}B & 2A\\ 2A' & 0\end{bmatrix} \quad (11)$$

Так как матрица $\Delta(D,C)$ является клеточной квазидиагональной и $\det D>0$, достаточно применить (10) к матрице $\Delta(C)$.

Определение энергетических соотношений и анализ устойчивости сложной СЭЭС. Преобразуем (2)

$$P_{\text{эл}i}=E_i^2y_{ii}\sin\alpha_{ii}+\sum_{j\neq i}^{n}\left(P_{ij}^{k}\sin\delta_{lj}-P_{lj}^{H}\cos\delta_{lj}+P_{dij}\omega_{ij}\right), \quad (12)$$

где

$$P_{ij}^{\text{К}}=E_iE_jy_{ij}\cos\alpha_{ij};P_{ij}^{\text{Н}}=E_iE_jy_{ij}\sin\alpha_{ij}.$$

Уравнение движения всей СЭЭС как целого [5]

$$T_{y\text{э}}d\omega_{\text{э}}/dt=P_{\tau}^{\text{э}}-P_{\text{эл}}^{\text{э}}, \quad (13)$$

где

$$P_{\text{эл}}^{\text{э}}=\sum_{i}^{n}P_{\text{эл}i}=\sum_{i}^{n}E_i^2y_{il}\sin\alpha_{ii}-\sum_{i}^{n}\sum_{i\neq i}^{n}P_{ij}\cos\delta_{ij};$$

$$\omega_{\text{э}}=\sum_{i}^{n}\frac{T_y\omega_i}{\sum_i^n}T_{yi};\ P_{\text{Т}}^{\text{э}}=\sum_{i}^{n}P_{\text{Т}i};\ T_{y\text{э}}=\sum_{i}^{n}T_{yi}.$$

На основе (1), (2), (12) и (13), обозначив $T_i=T_{yi}/T_y$ и $\omega_{i\text{э}}=\omega_i-\omega_{\text{э}}$, получим уравнение относительного движения ротора агрегата i относительно ЭЭС как целого

$$T_{yi}d\omega_{i\text{э}}/dt=P_{\text{Т}i}-P_{\text{эл}i}-T_i(P_{\text{Т}}^{\text{э}}-P_{\text{эл}}^{\text{э}}). \quad (14)$$

В малых отклонениях, полагая $P_{\text{т}i}=\text{const}$ и $E_i=\text{const}$,

$$\begin{gathered}T_{yi}p^2\Delta\delta_{i\text{э}}+\sum_{j\neq i}^{n}P_{dij}p\Delta\delta_{i\text{э}}-\sum_{j\neq i}^{n}P_{dlj}p\Delta\delta_{j\text{э}}+\sum_{j=i}^{n}\left(P_{ij}^{\text{К}}\cos\delta_{ij}+P_{ij}^{\text{Н}}\sin\delta_{ij}\right)\\ \times\left(\Delta\delta_{i\text{э}}-\Delta\delta_{j\text{э}}\right)-2T_l\sum_{l\neq i}^{n}P_{il}^{\text{Н}}\sin\delta_{il}\Delta\delta_{i_{\text{э}}}-2T_i\sum_{l\neq l}^{n}\sum_{l\neq j}^{n}P_{jl}^{\text{Н}}\sin\delta_{jl}\Delta\delta_{j\text{э}}=0.\end{gathered} \quad (15)$$

Введением обозначений $x_i=\Delta\delta_{i\text{э}};\dot{x}_i=p\Delta\delta_{i\text{э}};\ddot{x}_i=p^2\Delta\delta_{i\text{э}}$ (15) приводится к общему виду (3). На основе (15) элементы матриц (D,B,C и А) находятся из выражений:

$$\begin{gathered}d_{ii}=T_{yi};d_{lj}=d_{ji}=0;b_{ii}=\sum_{l\neq i}^{n}P_{dil};b_{ij}=b_{ji}=-P_{dij}\\ c_{ii}=\sum_{l\neq i}^{n}P_{il}^{\text{К}}\cos\delta_{il}+(1-2T_i)\sum_{l\neq i}^{n}P_{il}^{\text{Н}}\sin\delta_{il};\\ c_{ij}=-2T_i\sum_{l\neq j}^{n}P_{jl}^{\text{Н}}\sin\delta_{jl}-P_{ij}^{\text{К}}\cos\delta_{ij}-P_{ij}^{\text{Н}}\sin\delta_{ij};\\ a_{ij}=-T_l\sum_{l\neq j}^{n}P_{jl}^{\text{Н}}\sin\delta_{jl}+T_j\sum_{l\neq i}^{n}P_{il}^{\text{Н}}\sin\delta_{il}-P_{ij}^{\text{Н}}\sin\delta_{ij},\end{gathered} \quad (16)$$

причем

$$a_{ij}=-a_{ji};a_{ii}=0.$$

Методика анализа статической устойчивости СЭЭС. Сформулируем методику анализа статической устойчивости СЭЭС.

1 Определяются выражения $P_{ij}^{\text{К}}\cos\delta_{ij}$ и $P_{ij}^{\text{Н}}\sin\delta_{ij}$.

2 Вычисляются все элементы матриц A,B,C.

3 Формируются матрицы-определители $\Delta(C)$ и $\Delta(B,A)$.

4 Вычисляются главные их диагональные миноры.

5 Делается вывод о сохранении устойчивости. Анализ статической устойчивости трехмашинной СЭЭС ($n=3$). Сформируем матрицу $\Delta(C)$ и применительно к ней запишем:

$$\Delta_1^c = c_{11} > 0;$$
$$\Delta_2^c = c_{11}c_{22} - c_{12}^2 > 0;$$
$$\Delta_3^c = c_{11}c_{22}c_{33} + 2c_{12}c_{13}c_{23} - c_{11}c_{23}^2 - c_{33}c_{12}^2 > 0.$$

Сформируем матрицу $\Delta(B, A)$

$$\Delta_1 = P_{d12} + P_{d13} > 0;$$
$$\Delta_2 = P_{d12}P_{d23} + P_{d13}(P_{d12} + P_{d23}) > 0; \quad (17)$$
$$\Delta_3 = \Delta_4 = \Delta_5 = \Delta_6 = 0.$$

При выполнении условий ($\Delta_i^c > 0$) невозможно нарушение апериодической устойчивости СЭЭС. В СЭЭС невозможно самораскачивание при $P_{dij} > 0$, так как $\Delta_i \geqslant 0$. Уместно заметить, что принятая к рассмотрению математическая модель сложной СЭЭС, описываемая (1) и (2), является упрощенной, базирующейся на часто применяемых общеизвестных допущениях: действие АРВ и переходные процессы в роторных контурах каждого генератора i отражаются упрощенно постоянством ЭДС E_i' за сопротивлением x_{di}' и введением демпферных коэффициентов $P\alpha_{ij}$[1,3,6]. Поэтому при определении границ апериодической и колебательной устойчивости неизбежны погрешности, обусловленные принимаемыми допущениями при составлении математической модели СЭЭС, и никоим образом не связанные с методом анализа устойчивости.

В работе основное внимание уделяется изложению нового подхода к анализу статической устойчивости сложной СЭЭС с демонстрацией его применения при анализе устойчивости упрощенной многомашинной СЭЭС.

Вывод. Представленный синтез подходов анализа работоспособности платформ, в соответствии с которым алгебраические критерии устойчивости формируются без составления характеристического уравнения, облегчает процедуру расчетов и анализа статической устойчивости сложной СЭЭС.

Список литературы

1. Тасмуханова А.Е., Шигапова Р.Р. Особенности шельфовых месторождений нефти // Вестник Евразийской науки. 2018.№2. С. 65 – 71.

2. Трофимов С.Е. Российский арктический шельф и новые геополитические вызовы // Известия СПбГУ. 2015. №2 (92). С. 82 – 87.

3. Козярук А.Е. Энергоэффективные электромеханические комплексы горнодобывающих и транспортных машин // Записки Горного института. 2016. № 218. [Электронный ресурс] URL: https://cyberleninka.ru/article/n/energoeffektivnve-elektromehanicheskie-kompleksv-gorno-dobyvavuschih-i-transportnyh-mashin (дата обращения: 04.02.2019).

4. Ерохов С.А. Повышение эффективности электропривода технологического комплекса буровой платформы // Известия Тульского государственного университет. Технические науки. 2019. В. 1. С. 639 – 644.

5. Козярук А.Е. Энергоэффективные электромеханические комплексы горнодобывающих и транспортных машин // Записки Горного института. 2016. № 218.

6. Момот Б.А. Сравнение различных схем выпрямления в составе электроприводов переменного тока / Б.А. Момот, В.С. Горбик // Естественные и технические науки, 2014. №1. С. 153-155.

7. Козярук А.Е., Васильев Б.Ю. Методы и средства повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронными электроприводами / Козярук А.Е., Васильев Б.Ю. // Вестник ЮУрГУ. 2015. №1/15. [Электронный ресурс] URL: http://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-sredstva-povysheniya-energoeffektivnosti-mashin-i-tehnologiy-s-asinhronnymi-elektroprivodami (дата обращения: 04.02.2019).

8. Жуков В.А. Подход машинного обучения при прогностике состояния дизельного двигателя с использованием данных контроллера двигателя / В. А. Жуков, С. Г. Черный, А. С. Соболев // Морская радиоэлектроника. 2022. № 4(82). С. 36-41. EDN AGDFRK.

9. Identification of the Harmonic Composition of Currents and Voltages in an Autonomous Power System with Unstable Current Frequency / P. P. Podelenyuk, S. G. Cherny, T. D. Kainova, A. A. Zhilenkov // Russian Electrical Engineering. 2022. Vol. 93, No. 6. P. 410-414. DOI 10.3103/s1068371222060074. EDN TJJUIS.

10. Степанов В.М., Котеленко С.В. Анализ технических решений по рекуперации электрической энергии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2011. Вып. 6. Ч. 1. С. 152 - 158.

11. Минаев И.Г. и др. Программируемые логические контроллеры в автоматизированных системах управления / И.Г. Минаев, В.М. Шарапов, В.В. Самойленко, Д.Г. Ушкур. 2-е изд., перераб. и доп. Ставрополь: АГРУС, 2010. 128 с.

12. Абрамов Б.И., Авдийский Е.И., Коган А.И., Кожаков О.И. Моцохейн Б.И., Парфенов Б.М. Современное и перспективное электрооборудование установок для бурения скважин глубиной до 3900 м // Электротехника, 2001, №1. С. 11-16.

13. Блантер С.Г., Суд И.И. Электрооборудование для нефтяной промышленности. Изд. «Недра», 1973. 374 с.

Димитров Константин Сергеевич, аспирант, atlaskonstanti@gmail.com, Россия, Керчь, Керченский государственный морской технологический университет,

Козаченко Любовь Николаевна, старший преподаватель, sudovodkgmtu@mail.ru, Россия, Керчь, Керченский государственный морской технологический университет,

Антипенко Инна Викторовна, старший преподаватель, asofi@mail.ru, Россия, Керчь, Керченский государственный морской технологический университет,

Медведева Татьяна Сергеевна, лаборант-исследователь, medvedeva_tanya_@mail.ru, Россия, Геническ, Херсонский Технический Университет

INCREASING THE RELIABILITY OF FUNCTIONING OF ELECTRICAL SYSTEMS OF DRILLING PLATFORMS

K.V. Dimitrov, L.N. Kozachenko, I.V. Antipenko, T.S. Medvedeva

The article considers the issues of increasing the reliability of functioning of electrical systems of drilling platforms. The most common problems associated with the power supply of platforms, such as power outages, overloads, are highlighted. Methods for increasing reliability are analyzed, including equipment redundancy, the use of intelligent control systems, the use of predictive analytics and the implementation of monitoring systems. The advantages and disadvantages of each of the methods are considered.

Key words: drilling platforms, stability, reliability, energy, offshore.

Dimitrov Konstantin Sergeevich, postgraduate, atlaskonstanti@gmail.com, Russia, Kerch, Kerch State Maritime Technological University,

Kozachenko Lyubov Nikolaevna, senior lecturer, sudovodkgmtu@mail.ru, Russia, Kerch, Kerch State Maritime Technological University,

Antipenko Inna Viktorovna, senior lecturer, asofi@mail.ru, Russia, Kerch, Kerch State Maritime Technological University,

Medvedeva Tatyana Sergeevna, laboratory assistant-researcher, medvedeva_tanya_@mail.ru, Russia, Genichesk, Kherson Technical University

УДК 621.31
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-586-587

ВЫБОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ

В. В. Кирюха, Ю. М. Горбенко

В статье рассмотрены теоретические и практические вопросы оптимизации выбора методов и средств контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитных материалах. Проанализированы достоинства и недостатки основных методов неразрушающего контроля, применяемых в настоящее время. Определены критерии оценки эффективности промышленных методов. Даны краткие теоретические выкладки, поясняющие работу средств контроля. На основании проведенного анализа и предложенных критериев выбора даны рекомендации для практического использования.

Ключевые слова: *контроль, измерение, датчик, измерительный преобразователь, точность контроля, оптимизация контроля.*

В настоящее время возводится достаточно большое количество производственных и складских помещений большой площади из гладкого или профилированного металлического листа с защитным лакокрасочным или полимерным покрытием. В большинстве случаев для изготовления такого листа используется ферромагнитные материалы. Толщина таких листовых панелей, как правило, составляет несколько миллиметров. Из таких листовых панелей монтируется помещение различного назначения с полезной площадью в десятке, сотни, а то и тысячи квадратных метров.

Такие сооружения подвергаются атмосферным воздействиям (ветер, снег, дождь) и значительным перепадам температур. Особенно это касается складских и производственных помещений на предприятиях, связанных с марикультурой и гидробиологией. Такие помещения располагаются на берегу моря и подвергаются значительному повреждающему воздействию "соленых" морских ветров. Совокупное воздействие повреждающих факторов приводит к частичному разрушению защитных лакокрасочных или пленочных покрытий и коррозионному повреждению участка ферромагнитного материала конструкционной панели. Если вовремя не производить ремонтные работы по восстановлению защитных покрытий, то дальнейшее воздействие разрушающих факторов может привести к необратимым разрушениям.

Для контроля за техническим состоянием таких сооружений желательно не менее двух раз в год проводить контроль качества защитных покрытий с выявлением зон для текущего ремонта. При необходимости проводить обследования в несколько тысяч (а то и десятков тысяч) квадратных метров, в том числе на высоте и в труднодоступных местах, такой контроль вызывает определенные трудности.

Для проведения контроля желательно иметь прибор с автономным питанием, с помощью которого по определенным критериям (выбранным определенным тестовым параметрам) можно сделать заключение о состоянии того или иного участка контролируемой поверхности.

Общепринятым критерием качества состояния покрытия является равномерность его толщины. При неповрежденном защитном покрытии его толщина на всей площади составляет определенное значение (в зависимом от вида покрытия от 0,5 до 1,5 мм) отличающееся на разных участках не более чем на (15-20) %.

Если же покрытие повреждено, то в зоне повреждения происходит значительное изменение толщины как в сторону увеличения (набухания, появления окислов и коррозии) так и в сторону уменьшения (стирания защитного слоя). Колебания толщины могут составлять от «0» до (200-300) % от нормы.

Для целей контроля нет необходимости в высокой точности измерений. Точность измерений ± 20% является вполне достаточной.

Кроме того, прибор для оперативного контроля толщины покрытия должен быть удобным в эксплуатации, что подразумевает малый вес, автономное питание, простоту и удобство в проведении измерений, безопасность в эксплуатации. При эксплуатации прибора не должна требоваться специальная подготовка. Желательно, чтобы один работник за рабочий день мог обследовать не менее 1000 квадратных метров поверхности.

Таким требованиям, в той или иной степени, могут отвечать приборы, построенные на различных принципах действия. При этом мы будем рассматривать только неразрушающие методы контроля, для которых не требуется стационарная аппаратура [1].

К таким методам могут быть отнесены магнитные методы контроля, вихретоковые методы контроля, радиационные методы контроля и методы контроля, основанные на термоэлектрическом эффекте. При этом радиационные методы контроля и методы контроля, основанные на термоэлектрическом эффекте, могут быть сразу отклонены на основе следующих соображений.

Радиационные методы контроля бывают двух видов: метод обратного рассеяния бета-излучения и рентгенофлюоресцентный метод. Оба метода обладают достаточно высокой точностью (± 10%), но предоставляют повышенную стоимость из-за использования радиоактивных элементов.

Термоэлектрический метод основан на измерении термо-ЭДС, возникающий под действием тепла в зоне контроля, вызванной различием термоэлектрических свойств и теплопроводности основного металла и покрытия и зависящей от толщины покрытия. Этот метод применяется в основном для металлизированных покрытий толщиной до 50 мкм и не может быть использован для широкого спектра покрытий различного типа. Наиболее приемлемы магнитные и вихретоковые методы.

Вихретоковый метод основан [2] на регистрации взаимодействия собственного электромагнитного поля преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых этим преобразователем в детали и зависящих от электрофизических и геометрических параметров основного металла и покрытия. Метод применяют для неэлектропроводных покрытий на неферромагнитных металлах и электропроводящих покрытий на неферромагнитных и ферромагнитных металлах. При контроле толщины неэлектропроводных покрытий на деталях из неферромагнитных металлов метод применяют при условии, что значение шероховатости поверхности основного металла и покрытия R_a меньше толщины покрытия. При контроле толщины электропроводных покрытий на деталях из неферромагнитных металлов метод наиболее эффективен при условии, что удельные электрические проводимости основного металла и покрытия отличаются не менее чем в 2-3 раза. Относительная погрешность метода ± 5%.

Магнитные методы, в свою очередь, подразделяются на магнитоотрывной и магнитостатический методы, которые используют электромагниты и магнитоиндукционный метод.

Магнитоотрывной метод [3] основан на измерении силы отрыва сердечника постоянного электромагнита от контролируемой поверхности, которая зависит от толщины покрытия. Метод применяют для неферромагнитных покрытий на деталях из ферромагнитных металлов при толщине покрытия до 1000 мкм и ферромагнитных покрытий на деталях из неферромагнитных металлов при толщине покрытия до 25 мкм. Относительная погрешность метода ± 10%.

Магнитостатический метод основан на регистрации с помощью магниточувствительных элементов измерений напряженности магнитного поля в цепи электромагнита постоянного тока или постоянного магнита при изменении расстояния между ним и основным металлом детали из-за наличия покрытия. Метод применяется для неферромагнитных металлических и неметаллических покрытий и гальванических никелевых покрытий на ферромагнитных металлах. Относительная погрешность метода ± 10%. Магнитоиндукционный метод основан на определении изменений магнитного сопротивления участка цепи: преобразователь-контролируемая деталь, зависящего от толщины покрытия, по ЭДС, наводимой в измерительной обмотке преобразователя, питающего переменным током низкой частоты. Метод применяют для неферромагнитных металлических и неметаллических покрытий на ферромагнитных металлах. Относительная погрешность метода ± 5%.

Наибольший интерес для целей оперативного контроля толщины покрытия на ферромагнитных материалах представляет, на наш взгляд, метод с использованием индуктивных преобразователей [4,5].

Индуктивные преобразователи представляют собой катушку индуктивности, параметры которой изменяются при механическом перемещении элементов магнитопровода относительно друг друга.

Полное сопротивление любой катушки индуктивности (дросселя) складывается из активного и индуктивного сопротивлений:

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi \cdot fL)^2},$$

где R - активное сопротивление, Ом; f – частота, Гц; L – индуктивность, Гн.

Имеются две группы преобразователей: с изменяющимся активным сопротивлением и с изменяющейся индуктивностью. Преобразователи с изменяющейся индуктивностью могут быть выполнены в виде системы с незамкнутым магнитопроводом с изменяющимся зазором. Схематично конструкция такого преобразователя показана на рис.1.

Индуктивность катушки с обмоткой определяется по формуле:

$$L = \frac{w\Phi}{I},$$

где w – число витков катушки; Ф – магнитный поток, пронизывающий катушку, Вб; I – ток, проходящий по катушке, А.

В свою очередь, ток, проходящий в катушке, можно выразить следующим образом:

$$I = \frac{Hl}{w},$$

где Hl – МДС катушки, А.

Тогда

$$L = \frac{w^2}{R_m},$$

где R_m – магнитное сопротивление преобразователя, 1/Гн.

Полное магнитное сопротивление преобразователя складывается из магнитного сопротивления ферромагнитного участка и магнитного сопротивления зазоров.

Магнитное сопротивление ферромагнитного участка может быть определено как

$$R_{\text{ф}} = \frac{l_{\text{ф}}}{\mu_{\text{ф}} \cdot \mu_0 \cdot S_{\text{ф}}},$$

где $l_{\text{ф}}$ – длина средней силовой линии, проходящей по ферромагнитным участкам, м; $\mu_{\text{ф}}$ – относительная магнитная проницаемость ферромагнитного материала сердечника; μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$Гн/м; $S_{\text{ф}}$ – поперечное сечение ферромагнитных участков, м^2.

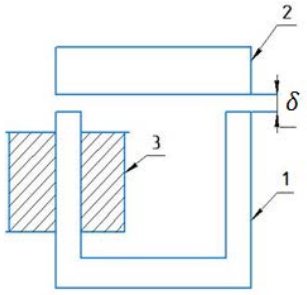


Рис. 1. Конструкция индуктивного преобразователя с изменяющейся индуктивностью: 1, 2 – магнитопровод; 3 – катушка

Магнитное сопротивление воздушных зазоров может быть определено как

$$R_{\text{з}} = \frac{2\delta}{\mu_0 \cdot S_{\text{з}}},$$

где δ – толщина воздушного зазора, м; $S_{\text{з}}$ – поперечное сечение воздушного зазора, м.

При $S_{\text{ф}} = S_{\text{з}} = S$ индуктивность преобразователя определяется как

$$L = \frac{\mu_0 S w^2}{2\delta + l_{\text{ф}} + l_{\mu_{\text{ф}}}}.$$

Так как $l_{\text{ф}}, l_{\mu_{\text{ф}}} \ll 2\delta$, то этими значениями можно пренебречь и считать, что индуктивность преобразователя определяется по формуле

$$L = \frac{\mu_0 S w^2}{2\delta}.$$

Построенный по такой схеме преобразователь будет обладать рядом недостатков: нелинейность характеристик, аддитивные погрешности и т.д.

Для устранения этих недостатков может быть применена дифференциальная схема включения или включение датчика и компенсатора в мостовую схему измерения. В любом случае имеется однозначная зависимость индуктивности датчика (L) от величины зазора в магнитопроводе (δ). Катушка датчика обладает активным (R) и индуктивным (X_L) сопротивлением. Общее сопротивление (Z) определяется, как было показано выше, по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2}.$$

Так как индуктивность датчика зависит от величины зазора в магнитопроводе (δ), то полное сопротивление датчика в свою очередь, будет зависеть от величины зазора в магнитопроводе т.е. от толщины на ферромагнитном листе [6].

Достоинством предлагаемого метода контроля является то, что датчик может быть выполнен в виде катушки в броневом сердечнике, а якорем может служить сам ферромагнитный материал контролируемой поверхности. Датчик плотно прижимается к контролируемой поверхности, при этом величина зазора в магнитопроводе будет определяться толщиной слоя лакокрасочного покрытия и коррозионных отложений на ферромагнитной поверхности контролируемого листа.

Для достижения равномерного прижатия датчика к контролируемой поверхности целесообразно использовать сильные постоянные магниты механически соединенные с броневым сердечником датчика в единую конструкцию.

В качестве таких магнитов могут быть использованы современные неодимовые постоянные магниты с суммарной силой притяжения 2-3кг.

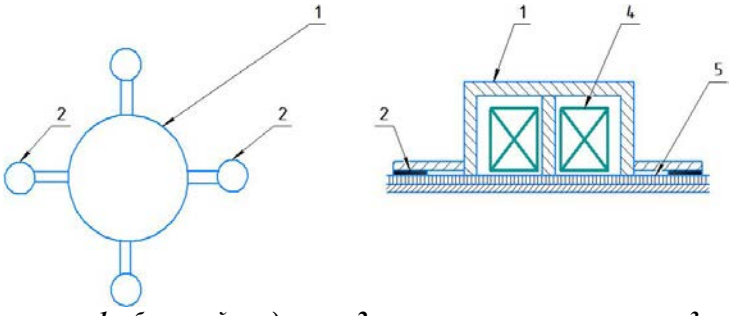


Рис. 2. Конструкция датчика: 1 – броневой сердечник; 2 – притягивающие магниты; 3 – крепежные элементы; 4 – обмотка датчика; 5 – контролируемый ферромагнитный материал с покрытием.

Возможная конструкция датчика показана на рис. 2.

Броневой сердечник (1) с размещенной внутри обмоткой (4) с помощью крепежных элементов (3) соединен с притягивающими магнитами (2). Датчик устанавливается на контролируемую поверхность (5) и плотно удерживается на ней притягивающими магнитами. Производится измерение. Затем с усилием 2-3 кг датчик отрывается от контролируемой поверхности и переустанавливается на следующий участок. Для целей оперативного контроля прибор должен иметь автономное питание. В качестве источника такого электропитания можем использоваться литий-ионная аккумуляторная батарея встроенная в корпус прибора с подключаемым внешним зарядным устройством. Такая конструкция позволяет уменьшить вес переносимого прибора до 3-4 кг.

Для питания измерительного моста с индуктивным датчиком необходимо переменное напряжение с частотой до 1000 Гц. Поэтому необходим инвертор для преобразования постоянного напряжения аккумуляторной батареи в переменное напряжение для питания измерительного моста.

Блок-схема поясняющая работу прибора показана на рис. 3.

От аккумуляторной батареи запитан инвертор. Переменное напряжение от инвертора подается на измерительный мост. В одно плечо моста включается измерительный преобразователь (датчик) L_1. В другое плечо моста включается компенсатор L_2 с параметрами равными параметрам измерительного преобразователя L_1 с «нулевым» зазором.

Потенциометром R_3 производится балансировка моста. Для повышения чувствительности прибора он может питаться от источника питания с повышенной частотой (около 1000гц).

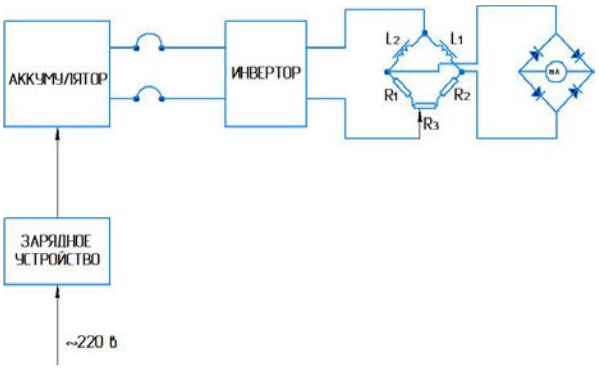


Рис. 3. Блок-схема прибора

На основании проведенного анализа, представленного в этой статье, можно сделать вывод о целесообразном применении приборов индуктивного типа для оперативного контроля покрытия на ферромагнитных листах большой площади.

Список литературы

1. ГОСТ 9.302-88 ЕСЗКС. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля: дата введения 1990-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. Москва: Стандартинформ, 2001. 40 с.
2. Наумчик И.В., Шевченко А.В., Алексеев К.В. Неразрушающий контроль толщины покрытий // Научный журнал «Фундаментальные исследования». 2015. №12. С. 935 – 939.
3. Шевтун Е.С., Уразбаев Е.Н. Измерители толщины лакокрасочных покрытий на ферромагнитных материалах // Материалы научно-практической конференции: Информационно измерительная техника и технологии. Томск, 2015. С. 32 – 41.
4. Кирюха В.В. Измерительные преобразователь в системах автоматики судов и предприятий рыбного хозяйства. – Калининград: Изд–во ФГБОУ ВО КГТУ, 2020. 280 с.
5. Кирюха В.В. Измерительные преобразователи в системах автоматики. Теория, устройство, применение. Владивосток: Изд–во Дальрыбвтуза, 2008. 216 с.
6. Кирюха В.В., Соломанюк Л.С. Задача оперативного контроля толщины слоя коррозии и способы его технического решения // Научные труды Дальрыбвтуза, 2001. Вып. 14. С. 39 – 43

Кирюха Владимир Витальевич, доцент, vkiryuha@list.ru, Россия, Владивосток, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,

Горбенко Юрий Михайлович, канд. техн. наук, доцент, gorbenko.um@mail.ru, Россия, Владивосток, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

SELECTION OF METHODS FOR CONTROL OF DEFECTS IN LARGE AREA FERROMAGNETIC SURFACES

V.V. Kiryukha, Yu.M. Gorbenko

The article discusses the theoretical and practical issues of optimizing the choice of methods and means for controlling e thickness of non-magnetic coatings on ferromagnetic materials. The advantages and disadvantages of the main methods of non-destructive testing currently used are analyzed. Criteria for evaluating the effectiveness of industrial methods are defined. Brief theoretical calculations explaining the operation of controls are given. Based on the analysis and the proposed selection criteria, recommendations for practical use are given.

Key words: control, measurement, sensor, measuring transducer, control accuracy, control optimization.

Kiryukha Vladimir Vitalievich, docent, vkiryuha@list.ru, Russia, Vladivostok, Far Eastern State Technical Fisheries University,

Gorbenko Yuri Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, gorbenko.um@mail.ru, Russia, Vladivostok, Far Eastern State Technical Fisheries University

УДК 621.31
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-590-591

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН В ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

П.Ю. Грачев, И.А. Федулов

В статье представлены результаты разработки и расчета инновационных коллекторных машин, у которых традиционный коллекторно-щеточный аппарат заменен узлом токосъема с контактными секциями, являющимися частями лобовых проводников обмотки якоря машины. Проведен анализ перспектив применения таких машин в транспортных средствах. Предложена методика расчета сопротивления обмотки якоря, учитывающая особенности конструкции новой коллекторной машины. Описаны преимущества, заключающиеся в увеличении надежности и уменьшении массо-объемных показателях разработанных двигателей постоянного тока. Показано, что предложенный инновационный коллекторный двигатель характеризует простота технологии изготовления.

Ключевые слова: транспортная средство, интегрированная коллекторная машина, узел токосъема, обмотка якоря.

Введение. Транспортные силовые установки в общем случае включают источник энергии, источник электропитания, преобразователь рода тока и электромеханический преобразователь для приведения в движение транспортного средства. Они предназначены для движения и электроснабжения транспортного средства. В малогабаритных транспортных средствах, например беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), силовые установки с электромеханическим преобразователем, например электродвигателем, по сравнению с топливной силовой установкой, имеют значительные преимущества [1].

В таких силовых установках в качестве электромеханических преобразователей применяют машины переменного тока, - как синхронные [2,3], так и асинхронные [4,5], а также машины постоянного тока, - как бесколлекторные [6,7], так и коллекторные [8]. В бесколлекторных машинах постоянного тока фазы обмотки статора подключены к источнику постоянного напряжения через автономный инвертор. Моменты переключения фаз обмотки вентилями инвертора зависят от положения ротора машины. Для определения положения вращающегося индуктора используются датчики положения ротора.

Преимущества коллекторных машин в качестве силовых двигателей малогабаритных транспортных средств, например, БПЛА, заключаются в повышенной надежности транспортных средств за счет простого регулятора напряжения якоря, и менее сложной защите системы управления от электромагнитных помех. Однако традиционный коммутационный аппарат коллекторной машины имеет массивный коллектор, увеличивающий массу и инерционность малогабаритного транспортного средства.

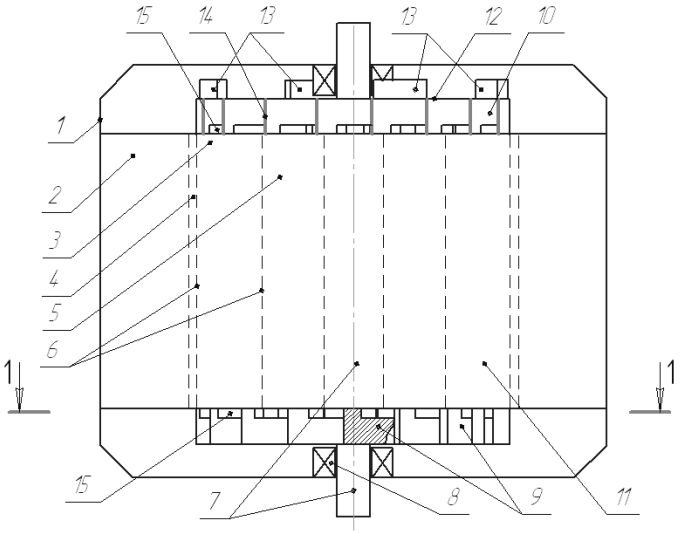


Рис. 1 Компоновка интегрированной инновационной коллекторной электрической машины: 1- корпус; 2- индуктор; 3 – якорь; 4 – воздушный зазор; 5 – сердечник якоря; 6 – пазы; 7- вал; 8- подшипники; 9,10 – лобовые проводники; 11 – активные проводники; 12 – контактные секции узла токосъема; 13 – щетки; 14 – изоляция; 15 - зазор

Поставлены следующие задачи. Провести описание конструктивных особенностей предложенного авторами технического решения [9], позволяющую исключить коллектор, как отдельную часть машины. Авторами предложена конструкция интегрированной инновационной коллекторной машины, в частности – двигателя, в котором традиционный коллекторно-щеточный аппарат заменен узлом токосъема, у которого контактными секциями являются поверхности лобовых проводников обмотки якоря двигателя. Предложена методика расчета сопротивления обмотки якоря, учитывающая особенности конструкции новой коллекторной машины. Показано уменьшение габаритов якоря интегрированной инновационной коллекторной машины и сопротивления его обмотки, за счет уменьшения длины лобовых проводников. Показаны перспективы применения разработанного двигателя в наземных и воздушных транспортных средствах.

Конструкция интегрированного коллекторного двигателя. На рис. 1 представлена итоговая конструкция и компоновка предлагаемой электрической машины.

На рис. 2 более детально отражена схема обмотки якоря как основной составляющей. Обмотки якоря предлагается выполнять четырехполюсными, двухслойными, волновыми, стержневыми. Обмоточные данные: $2p = 4$, $Z = Z_э = S = K = 17$, $y_1 = 4$, $y_2 = 4$, $y_к = 8$.

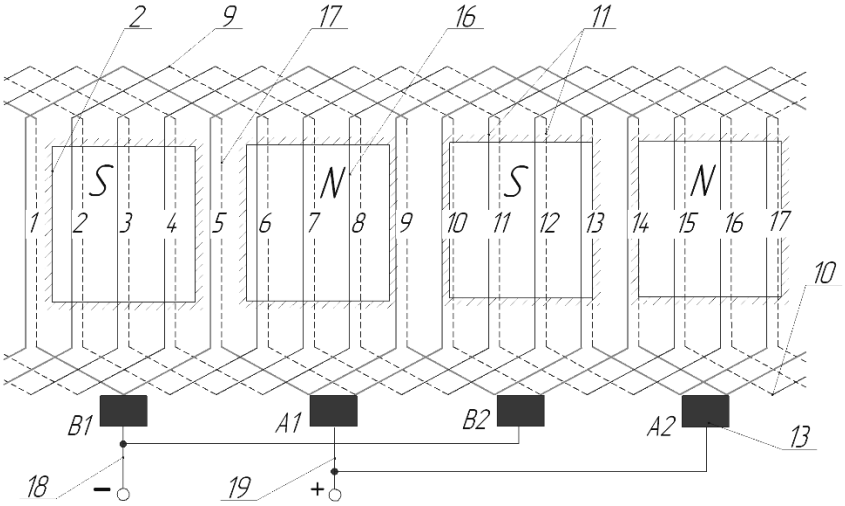
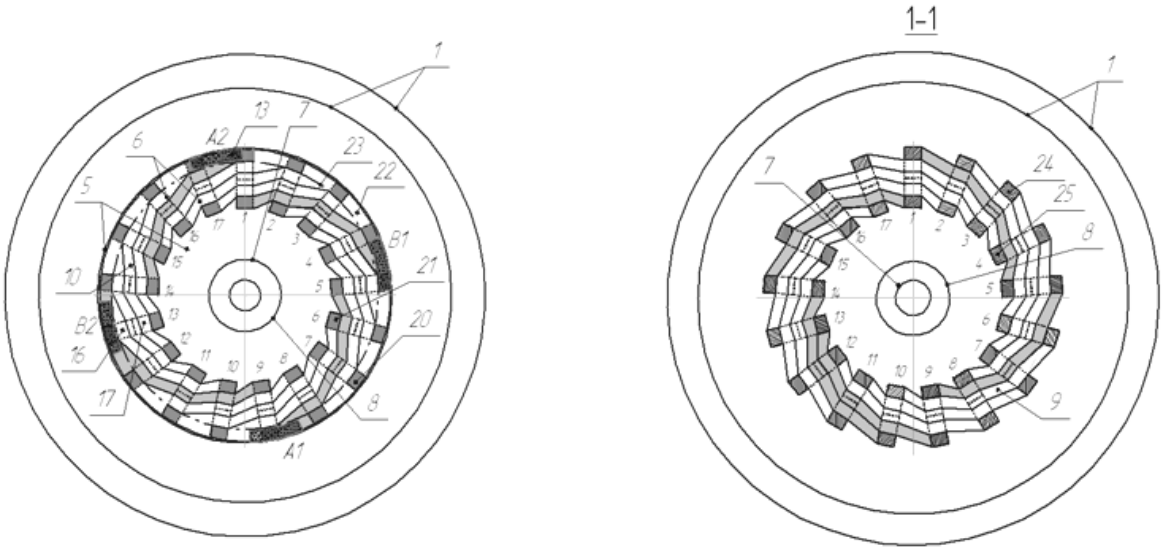


Рис. 2. Схема обмотки якоря интегрированной инновационной коллекторной электрической машины: 2 – индуктор; 9, 10 – лобовые проводники; 11 – обмотка; 16 – стержни верхнего слоя; 17 - стержни нижнего слоя; 18 - шина; 19 - аккумулятор

На рис.3 а) показан вид сверху (по рис.1) якоря 3 предложенной установки, часть каждого лобового проводника 10, выполнена в виде контактной секции 12 узла токосъема с ровными гладкими поверхностями 22, которые в совокупности образуют плоскую поверхность скользящего (щеточного) контакта, расположенную между штрихпунктирной окружностью 23 и внешними границами лобовых проводников 10. Щетки 13 узла токосъема, выделенные штриховкой, прижаты к этой поверхности. На рис.3 б) представлен вид сечения 1-1 по рис.1.



а ***б***

Рис. 3. Вид сечений интегрированной инновационной коллекторной электрической машины

Работает предложенная коллекторная машина на транспортном средстве также как обычная коллекторная машина постоянного тока.

На выводы якоря 18, 19, соединенные со щетками 13, через регулятор подают напряжение аккумуляторной батареи транспортного средства. Токи обмотки якоря 3 взаимодействуют с магнитным потоком полюсов N, S индуктора 2, создавая вращающий электромагнитный момент, приводящий во вращение якорь 3. При вращении якоря щетки скользят по поверхности контактных секций 12, переключая токи в секциях обмотки якоря 3. Слабым серым цветом выделены участки коммутируемых секций. Знак электромагнитного момента не меняется при постоянной полярности на выходе регулятора напряжения якоря., Электропривод с коллекторным двигателем разгоняется до рабочей скорости, приводя в движение транспортное средство.

Расчет сопротивления якоря интегрированного коллекторного двигателя. Индуктор такого двигателя практически не отличается от индукторов серийных двигателей. Поэтому для расчета его параметров можно применять известные методики. Якорь двигателя по конструкции существенно изменился. Поэтому необходима новая методика расчета параметров якоря. Далее изложена предложенная авторами методика расчета параметров обмотки якоря нового двигателя. Она отличается от обычной тем, что учитывает новую конструкцию лобовых частей обмотки. В частности, - неравномерное распределение плотности тока в проводящих участках коммутируемых секций, имеющих периодически изменяющееся по длине секций сечение меди, а также близость лобовых проводников обмотки к торцам зубцовой зоны сердечника якоря. Приведены также результаты сравнения массы и габаритов якоря нового двигателя с серийным двигателем той же мощности.

Рассмотрим упрощенную методику расчета активных сопротивлений обмотки якоря, основанную на допущении постоянства плотности тока на отдельных участках с постоянным сечением меди. Проводящий виток обмотки имеет участки с постоянным расчетным поперечным сечением (два стержня в пазах сердечника и два лобовых проводника над поверхностью зубцовой зоны) и четыре участка (перемычки) с уменьшенным, в два раза, сечением.

Расчетную методику ограничим машинами со стандартной частотой тока якоря менее 50 Гц, и высота прямоугольных проводников обмотки якоря менее 50 мм. В этом случае, можно рассматривать электромагнитные процессы в якоре, не учитывая вытеснения тока в проводниках обмотки.

В упрощенной методике расчета сопротивление витка предлагается принять равным сумме сопротивлений стержней и перемычек.

Такая методика не учитывает увеличение плотности тока в местах соединения стержней и лобовых проводников при отсутствии перемычек.

Задача определения активных сопротивлений обмотки с учетом неравномерности распределения плотности тока в проводящих участках новой обмотки якоря решена с применением метода конечных элементов для плоских моделей электростатики.

Выделены участки витка обмотки якоря с дискретно изменяющимся сечением. Проведено моделирование в Elcud установившихся электромагнитных процессов на этих участках при подаче напряжения на концы участков. Получены картины изменения плотности тока вдоль проводников вблизи участков с дискретно меняющимся сечением. Пример результатов моделирования приведен на рис 5. Стрелкой обозначена перемычка.

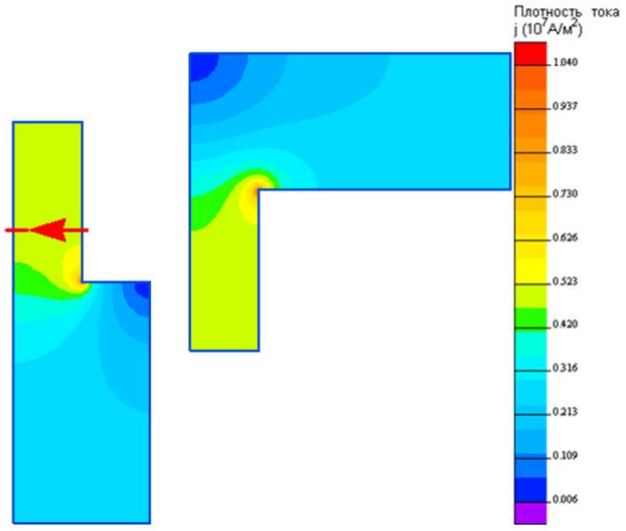


Рис. 4. Результаты моделирования плотности тока в витке обмотки

Нарастание плотности тока в участках витка, близких к перемычке, предложено считать эквивалентным уменьшению сечения этих участков. Это позволяет рассчитывать активные сопротивления участков витка с нарастающей плотностью тока, пользуясь усредненными эквивалентными сечениями этих участков:

Сравнение результатов расчета активного сопротивления витка по аналитическим выражениям с результатами расчета, при моделировании установившихся электромагнитных процессов в среде Elcud, показало, что погрешность расчета сопротивления не превышают 3%.

Применения инновационных коллекторных машин в транспортных средствах. Наибольшие перспективы имеют интегрированные коллекторные машины с двухслойной волновой обмоткой якоря, имеющие два проводника в пазу сердечника. Такие машины малой мощности имеют небольшой объем и могут работать в режиме двигателя, приводящего во вращение механизм движения транспортного средства, - трансмиссию наземного малогабаритного транспортного средства (мини электромобиля) или привод винта полностью электрифицированного небольшого БПЛА.

К преимуществам таких двигателей следует отнести не только уменьшенную длину и экономию меди (за счет объединения лобовых частей и щеточного токосъема в один узел), но и простоту технологии их изготовления. Не нужна операция соединения коллекторных пластин с секциями обмотки якоря коллектора. Якорь предложенной конструкции может быть изготовлен, например, с помощью 3D принтера.

Заключение. Показана перспективность применения рассматриваемых инновационных коллекторных машин в качестве силовых двигателей малогабаритных транспортных средств. Представлены особенности конструкции инновационной коллекторной машины постоянного тока, разработанной авторами. Это техническое решение получило патентную защиту. Предложена методика расчета сопротивления обмотки якоря предложенной инновационной машины, учитывающая особенности конструкции лобовых частей обмотки якоря. Описаны преимущества в технологии изготовления и массо-объемных показателях разработанной машины при ее применении в качестве электродвигателя малогабаритных транспортных средств.

Список литературы

1. Кирюхина Е.А., Шамбазов Р. Системы двигательных установок для беспилотных летательных аппаратов. Научный альманах Центрального Черноземья. 2022. № 3-6. С. 44-52.
2. Гончаровский О.В., Южаков А.А., Сторожев С.А., Никулин В.С. Стартер-генератор на основе синхронной машины с постоянными магнитами. Электротехника. 2023. № 11. С. 43-47.
3. Грачев П.Ю., Ежова Е.В., Горбачев Е.Е., Макаров Д.В. Управляемый электродвигатель для силовой установки летательного аппарата. Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 225-231.
4. Грачев П.Ю., Стрижакова Е.В., Макаров Д.В., Горбачев Е.Е. Повышение эффективности с/х транспортных средств за счет применения гибридных силовых установок. Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 1 (16). С. 142-147.
5. Грачев П.Ю., Федулов И.А. Режимы транспортной силовой установки с двумя уровнями напряжения, включающей асинхронный стартер-генератор. Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 2 (98). С. 10-16.
6. Юртаев А.Г., Степанов М.Ф., Петров Д.Ю. Моделирование системы управления с бесколлекторным электродвигателем постоянного тока. Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 8. С. 48-52.
7. Wang H,, Chau K. T., Liu W., Goetz S.M. Design and Control of Wireless Permanent-Magnet Brushless DC Motors/ IEEE Transactions on Energy Conversion. 2023. Volume: 38, Issue: 4, pp 2969 - 2979
8. Евсеев В.Ю., Савоськин А.Н. Моделирование режима электрического торможения тепловоза с последовательным возбуждением коллекторных тяговых двигателей при использовании силового полупроводникового преобразователя. Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20. № 2. С. 463-470.
9. Грачев П.Ю., Федулов И.А. Интегрированная коллекторная машина. Патент на изобретение RU 2792760 C1, 23.03.2023. Заявка № 2022118361 от 06.07.2022.

Грачев Павел Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, pgrachov@mail.ru , Россия, Самара, Самарский государственный университет путей сообщения,

Федулов Иван Александрович, аспирант, ivanfedulov673@gmail.com, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

CALCULATION FEATURES AND APPLICATION PROSPECTS INTEGRATED COLLECTOR MACHINES IN VEHICLES

P.Y. Grachev, I.A. Fedulov

The article presents the results of the development and calculation of innovative collector machines, in which the traditional collector-brush apparatus has been replaced by a current collector unit with contact sections that are parts of the frontal conductors of the armature winding of the machine. The analysis of the prospects for the use of such machines in vehicles is carried out. A method for calculating the resistance of the armature winding is proposed, taking into account the design features of the new collector machine. The advantages of increasing reliability and reducing the mass-volume parameters of the developed DC motors are described. It is shown that the proposed innovative collector engine is characterized by the simplicity of the manufacturing technology.

Key words: vehicle, integrated collector machine, current collector unit, armature winding.

Grachev Pavel Yurevich, doctor of technical sciences, professor, pgrachov@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Transport University,

Fedulov Ivan Aleksandrovich, postgraduate, ivanfedulov673@gmail.com, Russia, Samara, Samara State Technical University

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.983.3.539.376
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-594-595

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВКИ

М.В. Ларина, И.С. Хрычев, Г.А. Нуждин

Выполнено CAE-моделирование деформирования частей осесимметричных корпусных оболочек коническим пуансоном со ступенчатой поверхностью. Выполнена оценка изменения давления на пуансоне, интенсивностей напряжений и деформаций под рабочей поверхностью пуансона в зависимости от скорости деформирования, степени деформации и угла конусности рабочей части пуансона. Получены графические зависимости, наглядно иллюстрирующие изменение исследуемых параметров.

Ключевые слова: моделирование, формообразование, деформирование, деформации, сила, исследование.

В статье рассмотрен процесс локального формообразования корпусной заготовки из титанового сплава. Предполагается создание ступенчатого рельефа на внутренней поверхности в соответствии с рабочим профилем пуансона. Ввиду использования высокопрочных материалов для заготовки под данный процесс могут возникать значительные нагрузки на контактных границах инструмента и заготовки. Поэтому необходимо выполнить оценку давлений на контактных границах, и напряженно-деформированного состояния заготовки в области контакта.

Выполнено CAE-моделирование деформирования частей осесимметричных корпусных оболочек коническим пуансоном со ступенчатой поверхностью.

Схема процесса представлена на рис. 1. Набор внутренних утолщений производится на полуфабрикатах из сплава ВТ6 при постоянной в процессе деформирования температуре $900°C$. Оценивалось влияние ширины формируемого утолщения b =2…8 мм, получаемого за счет истечения металла в зазором между пуансоном и матрицей. Варьировалась скорость деформирования 30…100 мм/мин; коэффициент контактного трения 0,3…0,7. Угол конусности $\alpha = 5°$. Угол рабочего элемента пуансона $\beta = 5...20°$. Угол ступени пуансона $\gamma = 10...60°$. Диаметр заготовки $D_0 = 300$ мм. Диаметр внутренней поверхности заготовки $D_1 = 260$ мм. Условием выполнения операции считалось полное заполнение выступа в пуансоне под формируемое утолщение.

Проанализировано влияние ширины формируемого утолщения b, угла конусности инструмента γ.

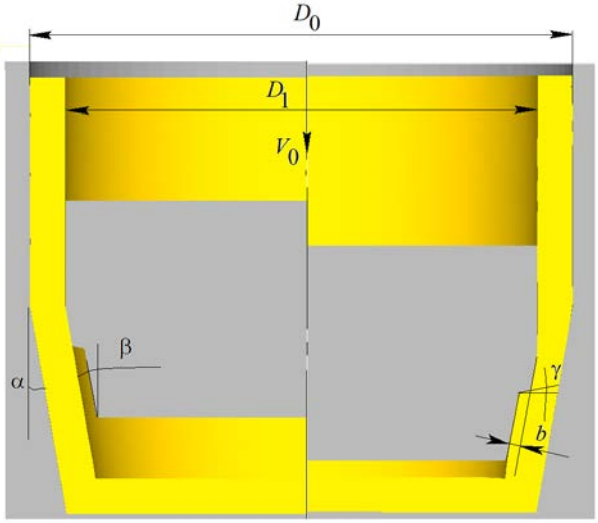
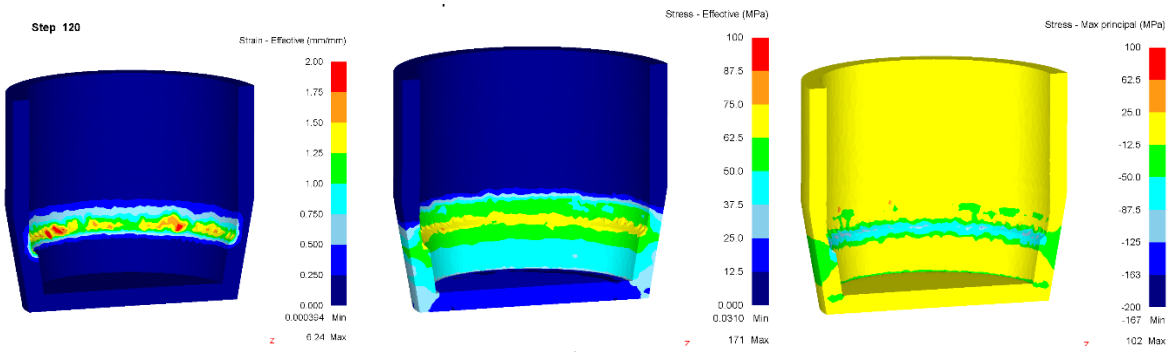


Рис. 1. Схема процесса

На рис. 2 представлены схемы, дающие представление о величинах интенсивностей деформаций (а), интенсивностей напряжений (б) и максимальных величинах напряжений (в).

Из рис. 2 видно расположение наиболее нагруженных зон заготовки. Для более наглядной оценки давлений на контактных границах, и напряженно-деформированного состояния заготовки были выбраны контрольные точки, схема с расположением которых представлен на рис. 3.



а *б* *в*

Рис. 2. Схемы, иллюстрирующие изменения величин интенсивностей деформаций (а), интенсивностей напряжений (б) и максимальных величинах напряжений (в)

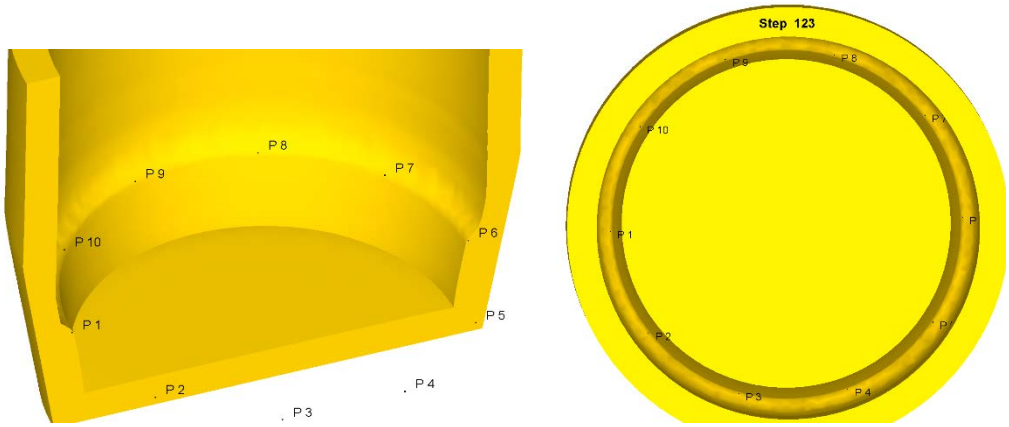


Рис. 3. Схемы с расположением контрольных точек

В данных точках проанализировано изменение величины критерия разрушения, интенсивностей напряжений и деформаций, максимальных величин напряжений и величин давлений. На рис. 4-8 даны полученные графики зависимости. На рис. 4 дан график изменения величины критерия разрушения от угла γ.

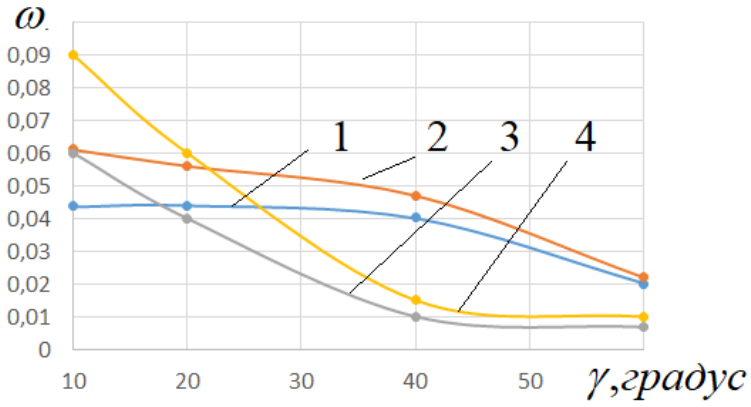


Рис.4. График изменения величины критерия разрушения от угла γ :

1 - b ***=5 мм;*** $V_0 = 30$ ***мм/мин; 2 -*** b ***=5 мм;*** $V_0 = 90$ ***мм/мин;***

3 - b ***=2 мм;*** $V_0 = 30$ ***мм/мин; 4 -*** b ***=2 мм;*** $V_0 = 90$ ***мм/мин***

Уменьшение угла конусности рабочей части пуансона позволяет снизить величину повреждаемости при формообразовании ребра шириной 2 мм в 9 раз и при формообразовании ребра шириной 5 мм в 2 раза. Увеличение скоростей деформирования приводит к росту повреждаемости на 20 %.

На рис. 5 дан график изменения величины интенсивности деформаций от угла γ.

Уменьшение угла конусности рабочей части пуансона позволяет снизить величину интенсивности деформаций при формировании ребра шириной 2 мм в 4 раза и при формообразовании ребра шириной 5 мм в 3 раза. Увеличение скоростей деформирования приводит к росту интенсивности деформаций на 30 %.

На рис. 6 дан график изменения величины интенсивности напряжений от угла γ.

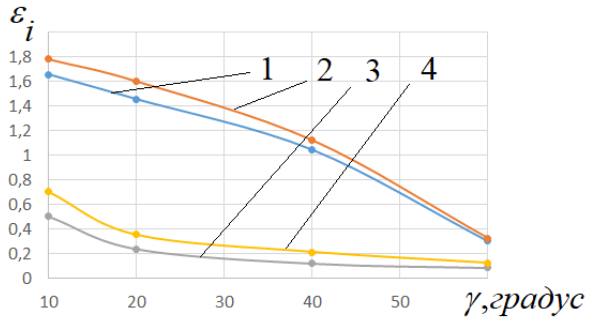


Рис.5. График изменения интенсивности деформаций от угла γ :

1 - b =5 мм; $V_0 = 30$ мм/мин; 2 - b =5 мм; $V_0 = 90$ мм/мин;

3 - b =2 мм; $V_0 = 30$ мм/мин; 4 - b =2 мм; $V_0 = 90$ мм/мин

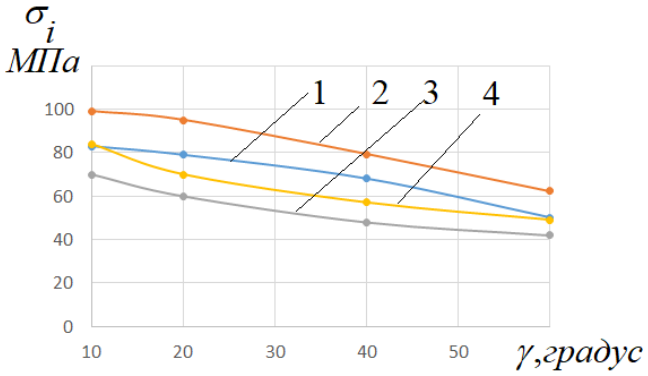


Рис. 6. График изменения интенсивности напряжений от угла γ :

1 - b =5 мм; $V_0 = 30$ мм/мин; 2 - b =5 мм; $V_0 = 90$ мм/мин;

3 - b =2 мм; $V_0 = 30$ мм/мин; 4 - b =2 мм; $V_0 = 90$ мм/мин

Уменьшение угла конусности рабочей части пуансона позволяет снизить величину интенсивности напряжений при формировании ребра шириной 2 мм на 15 % и при формообразовании ребра шириной 5 мм на 20%. Увеличение скоростей деформирования приводит к росту повреждаемости на 20 %.

На рис. 7 дан график изменения максимальных величин напряжений от угла γ .

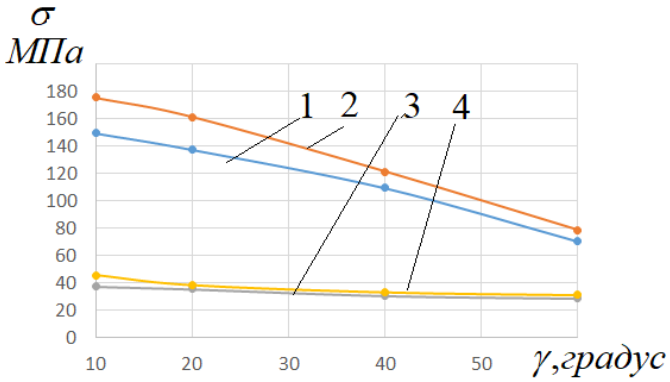


Рис. 7. График изменения максимальных величин напряжений от угла γ :

1 - b =5 мм; $V_0 = 30$ мм/мин; 2 - b =5 мм; $V_0 = 90$ мм/мин;

3 - b =2 мм; $V_0 = 30$ мм/мин; 4 - b =2 мм; $V_0 = 90$ мм/мин

Уменьшение угла конусности рабочей части пуансона позволяет снизить максимальных величин напряжений при формировании ребра шириной 2 мм на 5 % и при формообразовании ребра шириной 5 мм в 2 раза. Увеличение скоростей деформирования приводит к росту повреждаемости на 20 %.

На рис. 8 дан график изменения контактного давления от угла γ .

Уменьшение угла конусности рабочей части пуансона позволяет снизить контактное давление при формировании ребра шириной 2 мм на 40% и при формообразовании ребра шириной 5 мм на 20 %.. Увеличение скоростей деформирования приводит к росту повреждаемости на 20 %.

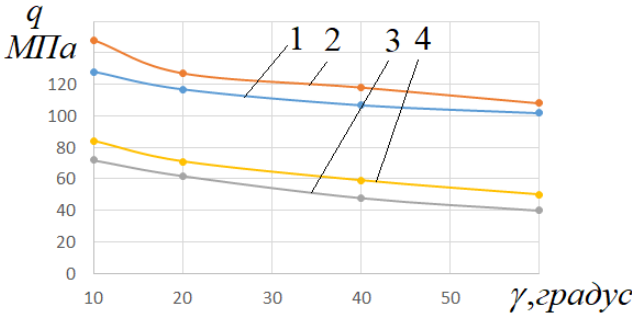


Рис. 8. График изменения контактного давления от угла γ :
1 - b =5 мм; $V_0 = 30$ мм/мин; 2 - b =5 мм; $V_0 = 90$ мм/мин;
3 - b =2 мм; $V_0 = 30$ мм/мин; 4 - b =2 мм; $V_0 = 90$ мм/мин

Таким образом установлено, что углы конусности рабочей части пуансона в интервале $40...60°$ позволяют добиться минимальных давлений на границах контакта заготовки и рабочей части пуансона, повреждаемости, интенсивностей напряжений и деформаций, и соответственно позволяют добиться больших степеней деформации и повысить стойкость инструмента.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 23-29-00470.

Список литературы

1. Яковлев С.С., Яковлев С.П., Чудин В.Н., Трегубов В.И., Черняев А.В. Изотермическое формоизменение из анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

2. Романов К.И. Механика горячего формоизменения металлов. М.: Машиностроение, 1993, 240 с.

3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1968, 400 с.

4. Теория обработки металлов давлением / Голенкова В.А., Яковлев С.П. и др. М. Машиностроение. 2009. 442 с.

5. Чудин В.Н., Пасынков А.А. Нестационарные процессы изотермической штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2018. №6. С. 23-28.

5. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.

6. Пасынков А.А., Борискин О.И., Ларин С.Н. Теоретические исследования операции изотермической раздачи труб из труднодеформируемых цветных спавов в условиях кратковременной ползучести // Цветные металлы. 2018. №2. С. 74-78.

7. Larin S.N., Pasynkov A.A. Analysis of forming properties during the isothermal upsetting of cylindrical workpieces in the viscous-plasticity mode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 441, Issue 1, 2 November 2018.

8. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. М., Металлургия, 1976. 488 с.

Ларина Марина Викторовна, канд. техн. наук, доцент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Хрычев Иван Сергеевич, аспирант, sulee@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нуждин Георгий Анатолиевич, канд. техн. наук, заместитель генерального директора, Россия, Москва, ООО НПФ «Техноликом»

ASSESSMENT OF TOOL PARAMETERS ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE WORKPIECE MATERIAL

M.V. Larina, I.S. Khrychev, G.A. Nuzhdin

CAE modeling of deformation of parts of axisymmetric housing shells by a conical punch with a stepped surface was performed. An assessment was made of the change in pressure on the punch, stress intensities and deformations under the workpiece by the working surface of the punch depending on the deformation rate, degree of deformation and conicity angle of the working part of the punch. Graphic dependencies were obtained that clearly illustrate the change in the studied parameters.

Key words: modeling, shaping, deformation, deformation, force, research.

Larina Marina Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Khrychev Ivan Sergeevich, postgraduate, sulee@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nuzhdin George Anatolyevich, candidate of technical sciences, deputy general director, Russia, Moscow, LLC NPF «Techpolikom»

УДК 621.98
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-598-599

ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЙ НАГРЕВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПЕРЕД ШТАМПОВКОЙ

А.В. Морозов, И.Е. Никоноров, А.О. Кошкина, В.А. Злобин, О.М. Каняева

В статье рассмотрены особенности применения электроконтактного нагрева заготовок из титановых сплавов перед штамповкой. Описаны преимущества данного метода по сравнению с традиционными способами нагрева, такими как печной и индукционный нагрев. Экспериментальные исследования включали анализ влияния силы тока, времени нагрева и контактного давления на равномерность нагрева заготовок. Определили рациональные режимы электроконтактного нагрева заготовки из титанового сплава ОТ4-1 для изготовления лопаток реверсивного устройства двигателя самолета Ил-76МД-90А, обеспечивающие равномерное прогревание и минимизацию дефектов. Полученные результаты демонстрируют сокращение времени нагрева и повышение качества обработки заготовок, что подтверждает перспективность метода для применения в авиационной и других высокотехнологичных отраслях.

Ключевые слова: электроконтактный нагрев, горячая штамповка, титановый сплав ОТ4-1, равномерность нагрева, температура нагрева.

Введение. Титановые сплавы благодаря уникальному сочетанию физико-механических свойств находят широкое применение в таких высокотехнологичных отраслях, как авиационная и космическая промышленность, судостроение, медицина и энергетика. Среди их основных преимуществ можно выделить высокую удельную прочность, низкую плотность, устойчивость к коррозии и жаропрочность. Эти качества делают титан и его сплавы незаменимыми при изготовлении ответственных конструкций, работающих в экстремальных условиях. Наиболее востребованными титанами сплавами являются, ОТ4, ОТ4-1, ВТ1-0 и ряд других, которые активно применяются в авиационной отрасли для производства таких деталей, как лопатки компрессоров, фюзеляжные элементы и другие компоненты.

Обработка титановых сплавов методом горячей штамповки требует тщательной подготовки заготовок, включающей процесс нагрева. От равномерности и точности температурного режима напрямую зависят механические свойства, пластичность материала и качество конечного изделия. Традиционные методы нагрева, такие как печной и индукционный нагрев, часто не обеспечивают должного контроля температурного поля по объему заготовки, что приводит к дефектам в процессе деформации. Основными проблемами являются перегрев поверхности, неравномерный нагрев по сечению и значительные энергетические затраты [1].

Одним из перспективных методов нагрева заготовок из титановых сплавов перед штамповкой является электроконтактный нагрев, который основан на использовании электрического тока для быстрого и равномерного прогрева заготовок. Электроконтактный нагрев позволяет нагревать металлические заготовки за счет выделения тепла при прохождении электрического тока через них. Это достигается благодаря эффекту сопротивления материала, согласно закону Джоуля-Ленца, который описывается следующим выражением:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau,$$

где: Q - выделяемое тепло, Дж; I - сила тока, А; R - электрическое сопротивление, Ом; τ - время нагрева, с.

Метод электроконтактного нагрева отличается рядом преимуществ:

- позволяет достичь необходимой температуры в несколько раз быстрее, чем традиционные методы.
- электрический ток проходит через весь объем заготовки, обеспечивая равномерное распределение тепла и минимизируя температурные градиенты.
- благодаря сокращенному времени нагрева и отсутствию воздействия окислительной атмосферы, минимизируется образование окалины.
- метод позволяет существенно снизить энергозатраты за счет отсутствия тепловых потерь, характерных для печного нагрева.

Тем не менее, существуют и определенные нюансы при использовании данного метода. Основные сложности связаны с необходимостью точного контроля силы тока и контактного давления, поскольку неравномерный контакт может привести к локальным перегревам и снижению качества заготовки. Для этого требуется определение рациональных параметров процесса и использование специальных систем контроля температуры.

Спрос на высококачественные и легкие материалы, такие как титановые сплавы, постоянно растет в авиастроении и других высокотехнологичных отраслях. На фоне увеличения требований к качеству и надежности продукции, предприятия сталкиваются с необходимостью поиска инновационных решений, направленных на оптимизацию процессов обработки и снижение производственных затрат. В этой связи электроконтактный нагрев представляет собой одно из наиболее перспективных направлений совершенствования процесса нагрева титановых заготовок перед штамповкой.

Для исследования эффективности метода электроконтактного нагрева в процессе горячей штамповки был выбран наиболее распространенный титановый сплав - ОТ4-1. Этот сплав отличается хорошей свариваемостью, пластичностью и коррозионной стойкостью, что делает его идеальным для использования в авиационных конструкциях. Основная цель данного исследования - определить рациональные параметры электроконтактного нагрева титановой заготовки, обеспечивающие равномерный ее прогрев и минимизирующие риск появления дефектов в процессе штамповки [2, 3, 4].

Методика экспериментальных исследований. Для проведения экспериментальных исследований использовали установку электроконтактного нагрева, включающую несколько основных компонентов. В её состав входит силовой понижающий трансформатор, который обеспечивал подачу тока до I = 3000 А. Для обеспечения надежного электрического контакта с заготовкой и минимизации тепловых потерь использовали медные контактные зажимы. Чтобы предотвратить перегрев и возможное оплавление контактных зон, была предусмотрена система охлаждения контактов. Контроль температуры поверхности заготовки в реальном времени осуществлялся с помощью инфракрасного пирометра (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальная установка для электроконтактного нагрева: 1 - медные контактные зажимы; 2 – заготовка; 3 - пирометр бесконтатного типа ПИТОН 102; 4 – трансформатор

Материалы исследования - образцы из титанового сплава ОТ4-1 размерами 180×85×1,5 мм для изготовления лопаток реверсивного устройства двигателя самолета Ил-76МД-90А.

Перед началом эксперимента заготовки из титанового сплава ОТ4-1 были очищены от загрязнений и оксидных пленок для улучшения качества электрического контакта. После подготовки заготовки закреплялись в медных контактных зажимах установки.

Для каждого эксперимента были установлены следующие параметры нагрева: сила тока I варьировалась от 1000 до 3000 А с шагом 500 А, контактное давление P изменялось в диапазоне от 0,5 до 2 МПа с шагом 0,5 МПа, а время нагрева τ составляло от 5 до 15 секунд с шагом 5 секунд. Температуру нагрева контролировали инфракрасным пирометром и поддерживали в пределах 800 … 900 °С. В процессе нагрева электрический ток подавали через медные контактные зажимы, а температура заготовки измеряли в реальном времени. В ходе эксперимента фиксировали время достижения целевой температуры и равномерность температурного распределения по всей длине и ширине заготовки [5].

На рис.2 представлен процесс электроконтактного нагрева заготовки.

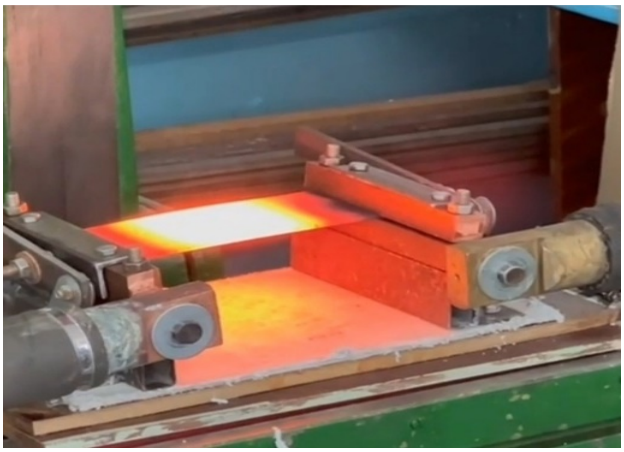


Рис. 2. Визуализация процесса электроконтактного нагрева заготовки

Эксперимент проводили в несколько этапов, на каждом из которых исследовали равномерность нагрева заготовок при различных значениях силы тока, времени нагрева и контактного давления с целью выявления рациональных условий процесса.

На первом этапе оценивали влияние силы тока I на температуру нагрева заготовки T при фиксированных параметрах времени $\tau = 10$ с. и контактном давлении $P = 1$ МПа.

На втором этапе исследовали влияние времени нагрева τ при фиксированной силе тока $I = 1500$ А и давлении $P = 1{,}5$ МПа. Время нагрева варьировалось от 5 до 15 с.

На третьем этапе анализировали влияние контактного давления на процесс нагрева при фиксированной силе тока $I = 1500$ А и времени нагрева $\tau = 10$ с. Давление изменяли в диапазоне $P = 0{,}5 \ldots 2$ МПа.

Результаты экспериментальных исследований. В ходе экспериментов исследовали зависимости температуры нагрева заготовок из титанового сплава ОТ4-1 от силы тока I, времени нагрева τ и контактного давления P. Полученные данные позволили выявить рациональные режимы, обеспечивающие равномерное распределение температуры по объему заготовок.

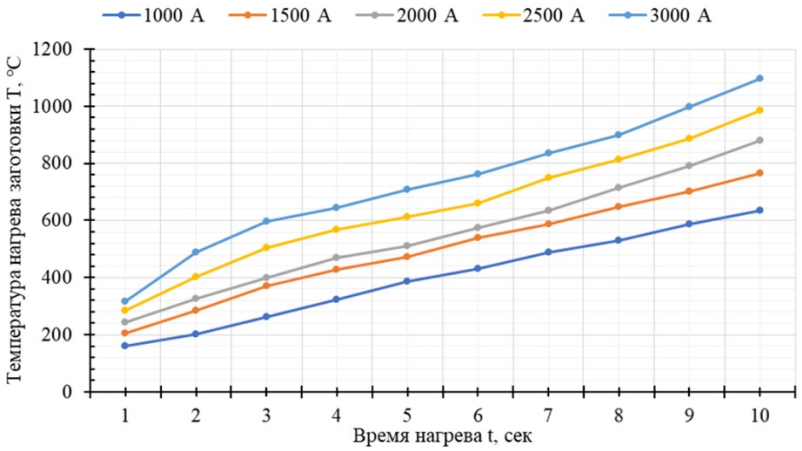


Рис. 2. График зависимости температуры нагрева заготовки из титанового сплава ОТ4-1 от силы тока при τ = 10 с; P = 1 МПа

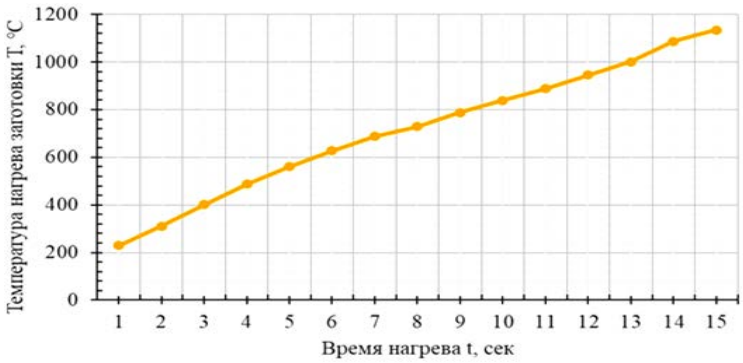


Рис. 3. Зависимость температуры от времени нагрева для сплава ОТ4-1 при I = 1500 А

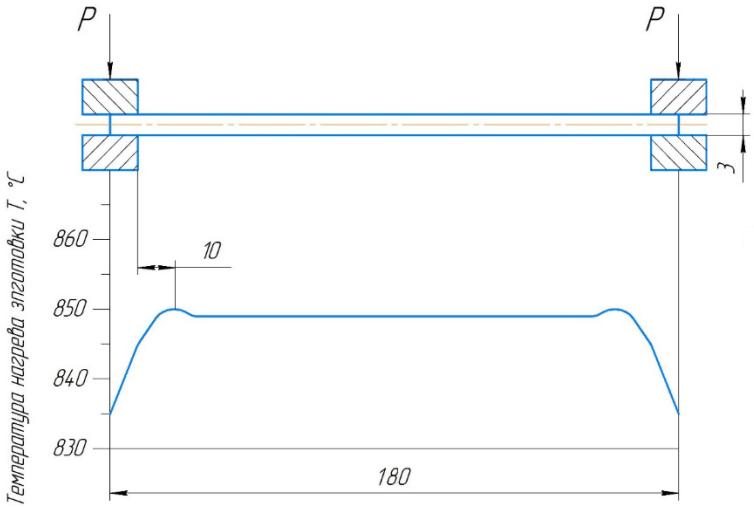


Рис. 4. Распределение температуры по длине заготовки из сплава ОТ4-1 при I = 1500 А

Установлено, что при увеличении силы тока I от 1000 до 3000 А температура нагрева заготовки возрастает почти линейно (рис. 2). Однако при превышении значения 2000 А наблюдался значительный разброс температуры по длине заготовки, что связано с локальными перегревами в местах контакта с медными зажимами. Это приводит к образованию окалины и снижению качества поверхности.

При фиксированной силе тока I = 1500 А и давлении контактов P = 1,5 МПа исследовали зависимость температуры от времени нагрева. Наилучшие результаты были получены при времени τ = 10 с, когда достигалась целевая температура ~ 850°С с минимальным разбросом (рис. 3). Увеличение времени нагрева свыше 15 с приводило к перегреву поверхностных слоев и снижению пластичности.

Для анализа равномерности температурного поля использовали тепловизионное обследование. Полученные результаты показали, что I = 1500 А, P = 1 … 1,5 МПа, τ = 10 с, температурные градиенты по длине заготовки не превышали 10 - 15°С, что свидетельствует о равномерном прогреве (рис. 4).

Проведенный сравнительный анализ, представленный в таблице, показал, что электроконтактный нагрев обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами:

существенно сокращается время нагрева заготовки по сравнению с печным нагревом.
повышается равномерность нагрева заготовки.

Сравнение эффективности методов нагрева титанового сплава ОТ4-1

Метод нагрева	Время нагрева, мин.	Разброс температуры, °С	Удлинение, %	Потери на окисление, %
Печной	20	±30	10	1,5
Индукционный	0,33	±20	11	1,0
Электроконтактный	0,17	±10	12,5	0,5

Заключение. В результате проведенных исследований было установлено, что электроконтактный нагрев титановых сплавов перед штамповкой обладает значительными преимуществами по сравнению с традиционными методами. Рациональные режимы, обеспечивающие достижение целевой температуры 800 … 900 °С с равномерным прогревом по длине заготовки составили I = 1500 А, τ = 10 с, P = 1 … 1,5 МПа.

Выявлено, что при силе тока I меньше 1000 А процесс нагрева становится менее эффективным из-за увеличения времени достижения требуемой температуры, а при силе тока выше 2000 А возникает риск перегрева поверхности, что негативно сказывается на качестве материала. Оптимальное время нагрева 10 секунд позволяет достичь равномерного распределения температуры с минимальными градиентами, снижая вероятность появления дефектов.

Контактное давление в диапазоне P = 1 … 1,5 МПа является достаточным для обеспечения надежного электрического контакта без деформации заготовки, что дополнительно повышает качество нагрева.

Таким образом, электроконтактный нагрев может быть рекомендован для применения в производстве ответственных деталей из титановых сплавов, требующих высокой точности и равномерности обработки, что делает его перспективным решением для авиастроения и других высокотехнологичных отраслей.

Список литературы

1. Багаутдинов Р.Р. Особенности механической обработки титановых сплавов / Р.Р. Багаутдинов, И.В. Макаров, Г.И. Бабина // Молодой ученый. - 2021. - №39 (381). - С.8-11.

2. Телегин А.С., Авдеева В.Г. Теплотехника и нагревательные устройства. М.: Машиностроение, 1985. 248 с.

3. Ключко С.Л. Нагрев и нагревательные устройства. Тольятти: ТГУ, 2007. Ч. 2. 105 с.

4. Романов Д.И. Электроконтактный нагрев металлов. М.: Машиностроение, 1981. 168 с.

5. Морозов А.В. Анализ результатов исследования потерь электрического тока при электромеханической обработке / А. В. Морозов, И. Е. Никоноров, А. Л. Миронов // Аграрная наука и образование на современном этапе развития : Материалы XIII Международной научно- практической конференции, посвященной 80-летию Ульяновского ГАУ, Ульяновск, 23 июня 2023 года / Редколлегия: И.И. Богданов [и др.]. Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2023. С. 589-594.

6. Никоноров И.Е. Перспективы применения электроконтактного нагрева при горячей штамповке / И. Е. Никоноров, А.В. Морозов // Вызовы и инновационные решения в аграрной науке: Материалы XXVII Международной научно-производственной конференции. Том 4. Майский: Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2023. С. 163-164.

7. Морозов А.В. Способы снижения потерь электрического напряжения в процессе электромеханической обработки / А. В. Морозов, И. Е. Никоноров, Н. И. Шамуков, А. С. Безруков // Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса: Материалы научно-технической конференции с международным участием имени А.Ф. Ульянова. Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. С. 150-153.

Морозов Александр Викторович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, lvi.mor@mail.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина,

Никоноров Илья Евгеньевич, аспирант, ilha.nikonorov@yandex.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина,

Кошкина Анастасия Олеговна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, fallen0008@mail.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет,

Злобин Вадим Александрович, канд. техн. наук, доцент, ktnzlobin@yandex.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет,

Каняева Ольга Михайловна, канд. техн. наук, доцент, kaniaeva@mail.ru, Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина

ELECTROCONTACT HEATING OF TITANIUM ALLOYS BEFORE STAMPING

A.V. Morozov, I.E. Nikonorov, A.O. Koshkina, V.A. Zlobin, O.M. Kanyaeva

The article considers the features of the application of electric contact heating of titanium alloy blanks before stamping. The advantages of this method compared to traditional heating methods, such as furnace and induction heating, are described. Experimental studies included an analysis of the effect of current, heating time and contact pressure on the uniformity of heating of blanks. Rational modes of electric contact heating of a blank made of titanium alloy OT4-1 for the manufacture of blades of the reversing device of the Il-76MD-90A aircraft engine were determined, ensuring uniform heating and minimization of defects. The obtained results demonstrate a reduction in heating time and an increase in the quality of processing of blanks, which confirms the prospects of the method for application in the aviation and other high-tech industries.

Key words: electric contact heating, hot stamping, titanium alloy OT4-1, heating uniformity, heating temperature.

Morozov Alexander Viktorovich, doctor of technical sciences, docent, head of chair, alvi.mor@mail.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin,

Nikonorov Ilya Evgenievich, postgraduate, ilha.nikonorov@yandex.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin,

Koshkina Anastasia Olegovna, candidate of technical sciences, docent, head of chair, fallen0008@mail.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University,

Zlobin Vadim Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, ktnzlobin@yandex.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University,

Kanyaeva Olga Mikhailovna, candidate of technical sciences, docent, kaniaeva@mail.ru, Russia, Ulyanovsk, Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin

УДК 531.44
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-602-603

ДВИЖЕНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА ПРИ ПРЕДЕЛЬНОМ СЦЕПЛЕНИИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ

Н.И. Федоринин

Получена математическая модель качения осесимметричного тела по шероховатой поверхности с учетом возможного проскальзывания как одной из точек контакта, так и обеих сразу. Установлено, что при качении с проскальзыванием задача сводится к решению дифференциального уравнения 3-го порядка относительно виляния тела.

Ключевые слова: трение скольжения, закон Амонтона-Кулона, математическая модель, преобразование координат.

Для решения задач о движении твердого тела по шероховатой поверхности при учете возможного проскальзывания контактирующих поверхностей (как это происходит, например, при движении колесной пары по рельсу) необходимо учитывать тот факт, что с началом проскальзывания, согласно закона Амонтона-Кулона, статический характер связи контактирующих тел меняется на кинематический. В настоящей работе на примере движения простейшего осесимметричного тела получена единая математическая модель, описывающая качение с проскальзыванием тела по шероховатой поверхности.

На шероховатой горизонтальной поверхности (в дальнейшем столе) располагается тело (в дальнейшем модель), представляющее собой два тонких однородных одинаковых диска радиуса R, жестко соединенных друг с другом в центрах масс недеформируемой осью длиной $2b$ (рис. 1, на рисунке стол не показан).

При рассмотрении движения модели используются две системы координат: одна жестко связана со столом (глобальная), другая – с моделью (местная). Глобальную систему координат будем обозначать прописными буквами $\{X, Y, Z\}$, а местную – строчными $\{x, y, z\}$. Оси X и Y глобальной системы координат располагаются в плоскости стола, а ось Z - перпендикулярно плоскости стола. Начало местной системы координат находится в центре масс модели. Ось y совпадает с осью модели. Местная система координат не привязана жестко к модели – местные

оси x и z не вращаются вместе с моделью, а все время движения остаются: ось x – горизонтальной, а ось z – вертикальной.

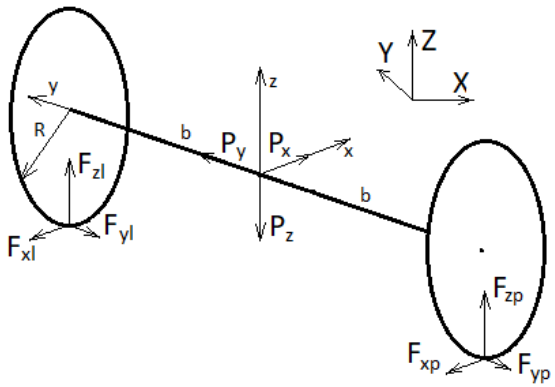


Рис. 1. Схема процесса

Масса модели - m , главные моменты инерции - J_1 и $J_2 = J_3$ ($J_1 < J_2$). Коэффициент сухого трения материала модели по материалу стола μ .

Модель начинает движение из состояния покоя под действием постоянной в глобальной системе координат силы $\overline{P} = (P_X, P_Y, -P_Z)$, приложенной к центру масс модели (знак «-» перед P_Z гарантирует прижим модели к столу). Проекция силы $\overline{P}$ на горизонтальную плоскость составляет с осью X угол β . Реакции в точке контакта модели со столом обозначены $\overline{F}_l$ и $\overline{F}_p$ (индексы l и p означают соответственно левую и правую по ходу движения модели точки контакта со столом). На рис. 1 показаны действующие силы в проекции на местные оси координат.

Положение модели в пространстве может быть полностью определено при помощи глобальных координат центра масс модели X_r , Y_r , Z_r и углов, характеризующих изменение ориентации модели в глобальной системе, которые по аналогии с движением вагона можно назвать [1]: угол боковой качки φ **(**поворот относительно местной оси x **)**, угол собственного вращения θ **(**поворот относительно местной оси y **)** и угол виляния ψ **(**поворот относительно местной оси z **).**

Уравнения движения твердого тела имеют вид [2] (в первых трех используются проекции реакций в глобальной системе координат, а в остальных – в местной)

$$m\ddot{X}_r = P_X - F_{Xl} - F_{Xp}$$
$$m\ddot{Y}_r = P_Y - F_{Yl} - F_{Yp}$$
$$m\ddot{Z}_r = -P_Z + F_{Zl} + F_{Zp}$$
$$J_2\ddot{\varphi} = (J_1 - J_2)\dot{\theta}\dot{\psi} + (F_{zl} - F_{zp})b - (F_{yl} + F_{yp})R \qquad (1)$$
$$J_1\ddot{\theta} = (F_{xl} + F_{xp})R$$
$$J_2\ddot{\psi} = (J_2 - J_1)\dot{\varphi}\dot{\theta} + F_{xl}b - F_{xp}b$$

Матрица перехода от глобальных координат к местным, следуя [3]

$$B = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (2)$$

Поэтому проекции реактивных сил в местной системе координат связаны с проекциями в глобальной системе (одинаково и для левой, и для правой точек контакта) следующим образом

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_X\cos\psi + F_Y\sin\psi \\ -F_X\sin\psi + F_Y\cos\psi \\ F_Z \end{pmatrix} \qquad (3)$$

Будем считать, что отрыва модели от стола не происходит, поэтому $Z_r \equiv R$ и $\varphi \equiv 0$. Тогда уравнения (1) с учетом (3) примут вид

$$m\ddot{X}_r = P_X - F_{Xl} - F_{Xp}$$
$$m\ddot{Y}_r = P_Y - F_{Yl} - F_{Yp}$$
$$0 = -P_Z + F_{Zl} + F_{Zp} \qquad (4)$$
$$0 = (J_1 - J_2)\dot{\theta}\dot{\psi} + (F_{Zl} - F_{Zp})b + (F_{Xl} + F_{Xp})R\sin\psi - (F_{Yl} + F_{Yp})R\cos\psi$$
$$J_1\ddot{\theta} = (F_{Xl} + F_{Xp})R\cos\psi + (F_{Yl} + F_{Yp})R\sin\psi$$
$$J_2\ddot{\psi} = (F_{Xl} - F_{Xp})b\cos\psi + (F_{Yl} - F_{Yp})b\sin\psi$$

При движении модели возможны 4 режима:
1) в обоих точках контакта модели и стола отсутствует проскальзывание (нормальное качение);
2) проскальзывает только левое колесо;
3) проскальзывает только правое колесо;
4) проскальзывают оба колеса.

Режим 1. Нормальное качение. В этом случае виляние модели отсутствует $\psi = \psi_0 = const \neq \frac{\pi}{2}$. Тогда уравнения (4) примут вид

$$\begin{gathered} m\ddot{X}_r = P_X - F_{Xl} - F_{Xp} \\ m\ddot{Y}_r = P_Y - F_{Yl} - F_{Yp} \\ 0 = -P_Z + F_{Zl} + F_{Zp} \\ 0 = (F_{Zl} - F_{Zp})b + (F_{Xl} + F_{Xp})R\sin\psi_0 - (F_{Yl} + F_{Yp})R\cos\psi_0 \\ J_1\ddot{\theta} = (F_{Xl} + F_{Xp})R\cos\psi_0 + (F_{Yl} + F_{Yp})R\sin\psi_0 \\ 0 = (F_{Xl} - F_{Xp})\cos\psi_0 + (F_{Yl} - F_{Yp})\sin\psi_0 \end{gathered} \tag{5}$$

Учитывая, что мгновенный центр скоростей модели при качении без проскальзывания будет находиться в точке контакта со столом, можем установить связь

$$\begin{gathered} \dot{X}_r = R\dot{\theta}\cos\psi_0 \\ \dot{Y}_r = R\dot{\theta}\sin\psi_0 \end{gathered}$$

или для ускорений

$$\begin{gathered} \ddot{X}_r = R\ddot{\theta}\cos\psi_0 \\ \ddot{Y}_r = R\ddot{\theta}\sin\psi_0 \end{gathered} \tag{6}$$

Если выразить из первого и второго уравнений (5)

$$\begin{gathered} F_{Xl} + F_{Xp} = P_X - mR\ddot{\theta}\cos\psi_0 \\ F_{Yl} + F_{Yp} = P_Y - mR\ddot{\theta}\sin\psi_0 \end{gathered} \tag{7}$$

и подставить в четвертое, получим

$$F_{Zl} - F_{Zp} = -(P_X\sin\psi_0 - P_Y\cos\psi_0)\frac{R}{b} \tag{8}$$

Из третьего уравнения (5)

$$F_{Zl} + F_{Zp} = P_Z \tag{9}$$

Складывая и вычитая выражения (8) и (9), получим

$$\begin{gathered} F_{Zl} = \frac{P_Z b - (P_X\sin\psi_0 - P_Y\cos\psi_0)R}{2b} \\ F_{Zp} = \frac{P_Z b + (P_X\sin\psi_0 - P_Y\cos\psi_0)R}{2b} \end{gathered} \tag{10}$$

Из пятого выражения (5) с учетом (6) и (7) можем выразить

$$\ddot{\theta} = \frac{(P_X\cos\psi_0 + P_Y\sin\psi_0)R}{J_1 + mR^2}$$

Считая, что движение начинается из состояния покоя, получим закон собственного вращения модели

$$\theta = \frac{(P_X\cos\psi_0 + P_Y\sin\psi_0)R}{2(J_1 + mR^2)}t^2 \tag{11}$$

Учитывая, что

$$F_{Xl}\cos\psi_0 + F_{Yl}\sin\psi_0 = F_{Xp}\cos\psi_0 + F_{Yp}\sin\psi_0$$

получим из (7)

$$\begin{cases} F_{Xl} = F_{Xp} = \dfrac{P_X - mR\cos\psi_0\ddot{\theta}}{2} \\ F_{Yl} = F_{Yp} = \dfrac{P_Y - mR\sin\psi_0\ddot{\theta}}{2} \end{cases}. \tag{12}$$

Выражение (11) определяет закон движения модели в режиме 1, а выражения (10) и (12) определяют неизвестные реакции.

Режим 1 продолжается до тех пор, пока выполняются соотношения

$$\begin{cases} F_{Xl}\cos\beta + F_{Yl}\sin\beta < \mu F_{Zl} \\ F_{Xp}\cos\beta + F_{Yp}\sin\beta < \mu F_{Zp} \end{cases}$$

Если ввести обозначение $\gamma = \frac{R}{b}$ и $\eta = \frac{J_1}{mR^2}$, то, учитывая (10) и (12), эти два неравенства можно записать одной строкой (верхний знак для левой точки, нижний – для правой)

$$P_X \cos\beta + P_Y \sin\beta - \frac{(P_X \cos\psi_0 + P_Y \sin\psi_0)\cos(\beta - \psi_0)}{\eta + 1} < \mu(P_Z \mp \gamma P_X \sin\psi_0 \pm \gamma P_Y \cos\psi_0) \tag{13}$$

Режим 2. Проскальзывание левого колеса. В этом случае соотношение (13) с верхним знаком не выполняется, остается только с нижним. Зато будут выполняться соотношения

$$F_{Xl} = \mu F_{Zl} \cos\beta$$

$$F_{Yl} = \mu F_{Zl} \sin\beta$$

Тогда из первых трех соотношений (4) можно выразить реакции в правой точке контакта

$$F_{Xp} = P_X - \mu F_{Zl} \cos\beta - m\ddot{X}_r$$

$$F_{Yp} = P_Y - \mu F_{Zl} \sin\beta - m\ddot{Y}_r$$

$$F_{Zp} = P_Z - F_{Zl}$$

и подставить в оставшиеся уравнения, то получим

$$0 = (J_1 - J_2)\dot{\theta}\dot{\psi} + (2F_{Zl} - P_Z)b + P_X R\sin\psi - P_Y R\cos\psi - m\ddot{X}_r R\sin\psi + m\ddot{Y}_r R\cos\psi \tag{14}$$

$$J_1\ddot{\theta} = (P_X - m\ddot{X}_r)R\cos\psi + (P_Y - m\ddot{Y}_r)R\sin\psi \tag{15}$$

$$J_2\ddot{\psi} = (m\ddot{X}_r - P_X)b\cos\psi + (m\ddot{Y}_r - P_Y)b\sin\psi + 2\mu F_{Zl} b\cos(\psi - \beta) \tag{16}$$

Если умножить выражение (15) на b и сложить с (16), умноженным на R, то получим

$$bJ_1\ddot{\theta} + RJ_2\ddot{\psi} = 2\mu bRF_{Zl}\cos(\psi - \beta)$$

откуда

$$2F_{Zl}\cos(\psi - \beta) = \frac{J_1\ddot{\theta}}{\mu R} + \frac{J_2\ddot{\psi}}{\mu b} \tag{17}$$

Координаты центра правого диска модели в местной системе координат $(0;-b;0)$, а в глобальной системе координат с учетом транспонированной матрицы (2)

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -b \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r + b\sin\psi \\ Y_r - b\cos\psi \\ 0 \end{pmatrix}$$

Соответственно скорость центра правого диска может быть выражена

$$\begin{pmatrix} V_{Xp} \\ V_{Yp} \\ V_{Zp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_p \\ \dot{Y}_p \\ \dot{Z}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_r + b\dot{\psi}\cos\psi \\ \dot{Y}_r + b\dot{\psi}\sin\psi \\ 0 \end{pmatrix} \tag{18}$$

Поскольку при рассматриваемом режиме движения правая точка модели, контактирующая со столом, не скользит, то для центра правого диска должно выполняться

$$V_{Xp} = R\dot{\theta}\cos\psi$$

$$V_{Yp} = R\dot{\theta}\sin\psi$$

Тогда с учетом (18)

$$\dot{X}_r = (R\dot{\theta} - b\dot{\psi})\cos\psi$$

$$\dot{Y}_r = (R\dot{\theta} - b\dot{\psi})\sin\psi$$

Продифференцировав полученные выражения, получим соотношение для ускорений

$$\begin{aligned} \ddot{X}_r &= (R\ddot{\theta} - b\ddot{\psi})\cos\psi - (R\dot{\theta} - b\dot{\psi})\dot{\psi}\sin\psi \\ \ddot{Y}_r &= (R\ddot{\theta} - b\ddot{\psi})\sin\psi + (R\dot{\theta} - b\dot{\psi})\dot{\psi}\cos\psi \end{aligned} \tag{19}$$

Преобразуем (15) с учетом (19)

$$(J_1 + mR^2)\ddot{\theta} - mRb\ddot{\psi} = (P_X\cos\psi + P_Y\sin\psi)R$$

откуда

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{\gamma(\eta + 1)}\ddot{\psi} + \frac{(P_X\cos\psi + P_Y\sin\psi)R}{J_1 + mR^2} \tag{20}$$

Подставляем полученные выражения (19) в уравнение (14), получим с учетом (17)

$$\frac{J_1}{\gamma}\ddot{\theta} + J_2\ddot{\psi} = \mu\cos(\psi - \beta)(P_Z b - (P_X\sin\psi - P_Y\cos\psi)R + (J_2 - J_1 - mR^2)\dot{\theta}\dot{\psi} + mRb\dot{\psi}^2)$$

С учетом (20)

$$\begin{aligned} \left(\frac{J_1}{\gamma^2(\eta + 1)} + J_2\right)\ddot{\psi} + \frac{\eta(P_X\cos\psi + P_Y\sin\psi)R}{\gamma(\eta + 1)} &= \mu\cos(\psi - \beta)(P_Z b - (P_X\sin\psi + P_Y\cos\psi)R + \\ &+ (J_2 - J_1 - mR^2)\dot{\theta}\dot{\psi} + mRb\dot{\psi}^2) \end{aligned} \tag{21}$$

Учитывая, что $J_2 - J_1 - mR^2 \neq 0$, можем выразить

$$\dot{\theta}\dot{\psi} = \frac{\left(\frac{J_1}{\gamma^2(\eta+1)} + J_2\right)\ddot{\psi} + \frac{\eta(P_X\cos\psi + P_Y\sin\psi)R}{\gamma(\eta+1)}}{J_2 - J_1 - mR^2} - \frac{\mu\cos(\psi-\beta)(P_Z b - (P_X\sin\psi - P_Y\cos\psi)R}{J_2 - J_1 - mR^2} - mRb\dot{\psi}^2 \quad (22)$$

Если продифференцировать выражение (21), получим

$$\left(\frac{J_1}{\gamma^2(\eta+1)} + J_2\right)\dddot{\psi} + \frac{\eta(-P_X\sin\psi + P_Y\cos\psi)R}{\gamma(\eta+1)}\dot{\psi} = -\mu\sin(\psi-\beta)\big(P_Z b - (P_X\sin\psi + P_Y\cos\psi)R + \quad (23)$$

$$+ (J_2 - J_1 - mR^2)\dot{\theta}\dot{\psi} + mRb\dot{\psi}^2)\dot{\psi}\big) + \mu\cos(\psi-\beta)\big(-(P_X\cos\psi - P_Y\sin\psi)R\dot{\psi} + (J_2 - J_1 - mR^2)(\ddot{\theta}\dot{\psi} + \dot{\theta}\ddot{\psi}) + 2mRb\dot{\psi}\ddot{\psi}\big)$$

Уравнение (23) вместе с выражениями (20) и (22) представляет собой дифференциальное уравнение третьего порядка относительно виляния ψ.

Условием сохранения режима 2 являются соотношения

$$P_X\cos\beta + P_Y\sin\beta - \frac{(P_X\cos\psi_0 + P_Y\sin\psi_0)\cos(\beta-\psi_0)}{\eta+1} < \mu(P_Z + \gamma P_X\sin\psi_0 - \gamma P_Y\cos\psi_0)$$

$$P_X\cos\beta + P_Y\sin\beta - \frac{(P_X\cos\psi_0 + P_Y\sin\psi_0)\cos(\beta-\psi_0)}{\eta+1} \geq \mu(P_Z - \gamma P_X\sin\psi_0 + \gamma P_Y\cos\psi_0)$$

Режим 3. Проскальзывание правого колеса. В этом случае соотношение (13) с нижним знаком не выполняется, будет только с верхним. Зато будут выполняться соотношения

$$F_{Xp} = \mu F_{Zp}\cos\beta$$

$$F_{Yp} = \mu F_{Zp}\sin\beta$$

Проделав выкладки, аналогичные тем, что были сделаны при рассмотрении режима 2, приходим к выводу, что уравнения движения в режиме 3 можно получить из уравнений движения для режима 2 заменой ψ на $-\psi$ у нечетных функций, содержащих ψ.

Условием сохранения режима 3 являются соотношения

$$P_X\cos\beta + P_Y\sin\beta - \frac{(P_X\cos\psi_0 + P_Y\sin\psi_0)\cos(\beta-\psi_0)}{\eta+1} < \mu(P_Z - \gamma P_X\sin\psi_0 + \gamma P_Y\cos\psi_0)$$

$$P_X\cos\beta + P_Y\sin\beta - \frac{(P_X\cos\psi_0 + P_Y\sin\psi_0)\cos(\beta-\psi_0)}{\eta+1} \geq \mu(P_Z + \gamma P_X\sin\psi_0 - \gamma P_Y\cos\psi_0).$$

Режим 4. Проскальзывают оба колеса. Тогда должны выполняться соотношения

$$F_{Xl} = \mu F_{Zl}\cos\beta$$

$$F_{Yl} = \mu F_{Zl}\sin\beta$$

$$F_{Xp} = \mu F_{Zp}\cos\beta \quad (24)$$

$$F_{Yp} = \mu F_{Zp}\sin\beta.$$

Подставив соотношения (24) в уравнения (4), получим из третьего уравнения (4)

$$F_{Zl} + F_{Zp} = P_Z \quad (25)$$

$$F_{Xl} + F_{Xp} = \mu P_Z\cos\beta \quad (26)$$

$$F_{Yl} + F_{Yp} = \mu P_Z\sin\beta$$

и из первых двух уравнений (4)

$$m\ddot{X}_r = P_X - \mu P_Z\cos\beta$$

$$m\ddot{Y}_r = P_Y - \mu P_Z\sin\beta$$

Из четвертого уравнения (4) с учетом (26)

$$F_{Zl} - F_{Zp} = \frac{(J_2 - J_1)\dot{\theta}\dot{\psi} - \mu P_Z R\sin(\psi-\beta)}{b} \quad (27)$$

Если сложить и вычесть выражения (25) и (27), можно получить выражения для вертикальных нагрузок

$$F_{Zl} = \frac{P_Z b + (J_2 - J_1)\dot{\theta}\dot{\psi} - \mu P_Z R\sin(\psi-\beta)}{b}$$

$$F_{Zp} = \frac{P_Z b - (J_2 - J_1)\dot{\theta}\dot{\psi} + \mu P_Z R\sin(\psi-\beta)}{b}$$

Из пятого уравнения (4) с учетом (26)

$$\ddot{\theta} = \frac{\mu P_Z R\cos(\psi-\beta)}{J_1} \quad (28)$$

Из шестого уравнения (4) с учетом (24) и (27)

$$J_2\ddot{\psi} = \mu\big((J_2 - J_1)\dot{\theta}\dot{\psi} - \mu P_Z R\sin(\psi-\beta)\big)\cos(\psi-\beta) \quad (29)$$

откуда при условии, что $J_2 \neq J_1$, можно выразить

$$\dot{\theta}\dot{\psi}\cos(\psi-\beta) = \frac{J_2\ddot{\psi} + \mu P_Z R\sin(\psi-\beta)\cos(\psi-\beta)}{\mu(J_2 - J_1)}. \quad (30)$$

Если продифференцировать (29), получим

$$J_2\ddot{\psi}\dot{\psi} = \mu\Big((J_2 - J_1)(\ddot{\theta}\dot{\psi} + \dot{\theta}\ddot{\psi}) - \mu P_Z R\dot{\psi}\cos(\psi - \beta)\Big)\cos(\psi - \beta) - \mu\Big((J_2 - J_1)\dot{\theta}\dot{\psi} - \mu P_Z R\sin(\psi - \beta)\Big)\dot{\psi}\sin(\psi - \beta) \quad (31)$$

Уравнение (31) вместе с соотношениями (28) и (30) является дифференциальным уравнением 3-го порядка относительно виляния ψ .

Список литературы

1. Динамика вагона (под ред. С.В. Вершинского). 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1991. 359 с.
2. Невзглядов В.Г. Теоретическая механика. М., Физматгиз, 1959. 584 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М., «Наука», 1973. 832 с.

Федоринин Николай Иванович, канд. техн. наук, доцент, n_fedorinin@mail.ru, Россия, Воронеж, Ростовский государственный университет путей сообщения филиал в г. Воронеж

MOVEMENT OF AN AXISYMMETRIC BODY WITH EXTREME ADHESION TO THE SURFACE

N.I. Fedorinin

A mathematical model of the rolling of an axisymmetric body over a rough surface is obtained, the possible slippage of both one of the contact points and two contact points at once is taken into account. It is established that in rolling with slippage the problem is reduced to solving a 3rd-order differential equation with respect to body wobble.

Key words: sliding friction, Amonton-Coulomb law, mathematical model, coordinate transformation.

Fedorinin Nikolay Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, n_fedorinin@mail.ru, Russia, Voronezh, Rostov State University of Railway Transport branch in Voronezh

УДК 621.7; 004.94
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-607-608

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ И РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ МЕЛКОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

М.А. Петров, Д.Х. Чан

В статье изучается применение аддитивных технологий или технологий 3D-печати для изготовления инструмента и последующего микродеформирования тонких листовых заготовок. Инструменты изготавливаются из отдельных деталей, которые затем собираются вместе. В качестве материалов деталей использовались полимеры и металлы. Сложность геометрии деталей не влияет на точность изготовления, обусловленную технологическими характеристиками оборудования. Показано, что изготовленный инструмент имеет отклонения от размеров, заложенных чертежом, обладает шероховаттостью поверхности, свойственную технологии печати. Для гарантирования высокой заданной точности изготовления инструмента рекомендуется закладывать технологические допуски и припуски на механообработку.

Ключевые слова: микровытяжка, размерный эффект, шероховатость поверхности, аддитивные технологии, DMLS, FFF, LCD, ABAQUS, QForm

Введение. Применение технологии 3D-печати обусловлено возможностью изготовления деформирующих инструментов или штампов любой сложности, без использования специального инструмента или шаблона, а также в широком диапазоне размеров. Работа с мелкогабаритными деталями, максимальный размер которых находится в диапазоне 2…20 мм, требовала бы изготовление деформирующего инструмента с применением таких технологий, как электроэрозионная обработка, которая требует также специального электрода-инструмента для создания несквозного контура или проволоки для разделительной операции, лазерная обработка и другие.

При изготовлении инструмента по технологии 3D-печати из металла или полимера сложность изделия не требует изменения в технологии печати и не является причиной увеличения себестоимость изготовления инструмента, другими словами, и деталь с простой геометрией, и деталь со сложной геометрией будут иметь одинаковую стоимость, так как за основу расчёта принимается затрачиваемое машинное время и стоимость исходного материала. По одной из ценовых моделей считается, что с ростом сложности детали и объёмом её производства её изготовление технологиями 3D-печати становится более экономически целесообразным. Однако по другим моделям ключевым может оказаться количество изготавливаемых деталей [1, 2, 3]. При изготовлении мелкой серии деталей, деформирующий инструмент может быть изготовлен из полимера, а не из металла, что снизит стоимость и сроки его изготовления, а также может устранить необходимость выполнения дорогостоящих работ по пост-обработке, а именно термообработку (отжиг), с целью снятия остаточных напряжений, шлифовальных работ, работ по уменьшению внутренней пористости с помощью изостатического прессования (сжатия).

В ряде исследовательских работ, посвящённых изготовлению деформирующего инструмента, показано, в каких операциях может быть применён напечатанный инструмент и из какого материала он может быть изготовлен в этих случаях. Применение аддитивных технологий или 3D-печати для изготовления микроинструмента встречается редко. Авторы работ [4, 5] применили технологию селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting или сокр. SLM) при изготовлении инструмента для реализации комбинированного процесса микродеформирования, а именно вырубки и последующей вытяжки стаканчика по схеме «дном вверх» (рис. 1). Ограничением применения родственных технологии SLM процессов является то, что они требуют металлические порошки, фракционный состав которых варьируется от 20 до 60 мкм. Для микроинструмента это является большим размером, который существенно изменяет морфологию поверхности. Известен факт того, что с уменьшением размеров (габаритов) изделия увеличивается влияние размерных эффектов. Так, например, шероховатость поверхности или точность получения радиуса скругления заходного ребра матрицы для вытяжки изменит благоприятное окно технологических параметров (силу прижима, коэффициент трения и т.д.).

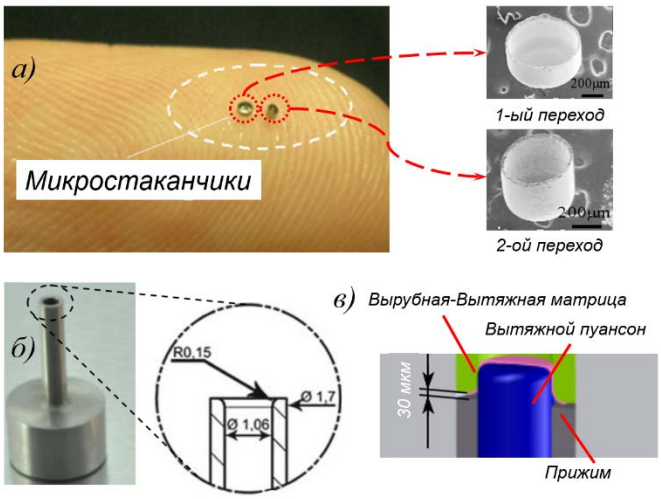


Рис. 1. Пример реализации комбинированного процесса вырубки и вытяжки [4, 5]: полученные детали (а), верхний инструмент (б) и схема процесса (в)

Материал заготовки. В качестве материалов заготовок использовались следующие материалы: медь М1 (по ГОСТ 859-2014), латунь Л63 (мягкая, по ГОСТ 15527-2004) и алюминий технической чистоты А5 (ДПРНМ, по ГОСТ 618-2014). Толщина листовых заготовок составляла 100 мкм. Следует отметить, что в исследовании применялась также и фольга из алюминия, согласно ТУ 1811-005-53974937-2004 и ГОСТ 745-2014, сложенная в несколько раз, до получения номинальной толщины заготовки: при толщине фольги S_0 = 10 мкм – 10 слоёв, а при S_0 = 25 мкм – 4 слоя. Применение «слоёной» заготовки позволяло оценить точность изготовления инструмента по наличию или отсутствию повреждений на внешних слоях фольги. При моделировании использовалась также латунь марки Л80, для которой экспериментальных исследований не проводилось. В отличие от Л63, латунь Л80 имеет менее высокое значение предела прочности и более высокое значение относительной деформации при разрушении ($\sigma_в^{Л80}$=370 МПа и $\delta^{Л80}$=40% против $\sigma_в^{Л63}$=400 МПа и $\delta^{Л63}$=38%). Кроме этого, в условиях сухого трения он показывает более высокий коэффициент трения, что будет снижать его способность к вытяжке без смазки на неполированной поверхности инструмента.

Общая методика исследования. В работе активно применяется компьютерное моделирование на основе конечных элементов (КЭМ), целью которого является определение технологических параметров процесса и последующая оценка износа инструмента.

Определение износа поверхности. Известно, что износ инструмента при вытяжке является следствием наличия высокого контактного давления. Сравнение результатов КЭМ, выполненного в программе Abaqus, и экспериментов показало совпадение общих областей износа. На рис. 2а показан результат КЭМ (поле контактных давлений) и на рис. 2б снимок с настольного электронного микроскопа ZEM 20 (ZepTools, КНР). Видно, что результаты КЭМ более наглядны, чем снимок, показывают равномерный износ в области закругления матрицы (белый поясок). Результаты экспериментов показывают неравномерный износ поверхности в этих областях.

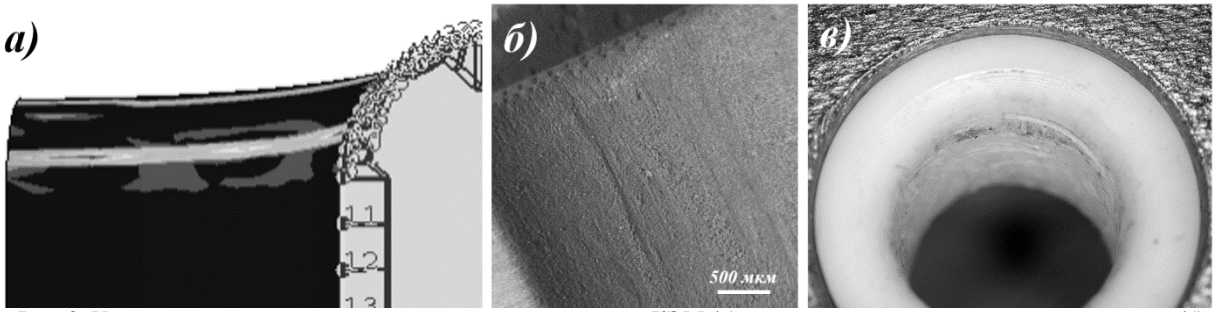


Рис. 2. Характеристика износа поверхности при помощи: КЭМ (а), настольного электронного микроскопа (б) и цифрового микроскопа (в)

На рис. 2в показан снимок с цифрового микроскопа, который отражает общую картину износа заходного участка поверхности матрицы, без анализа величины износа по рассматриваемой площади поверхности.

Проектирование и изготовление деталей инструмента. Рассмотрим проектирование и изготовление инструмента методами 3D-печати, методика которой была рассмотрена авторами ранее [6]. Была применена стандартная методика проектирования 3D-моделей деталей штампов для разделительной и формообразующей операций. Проектирование выполнялось в CAD-программах, обладающих современным инструментарием для реализации твердотельного моделирования. На разных стадиях решения задачи применялись такие программы, как Autodesk Inventor, Т-Флекс CAD и Компас 3D. На рис. 3 представлены 3D-модели сборки вырубного и вытяжного штампов, а также схемы реализации процессов деформирования.

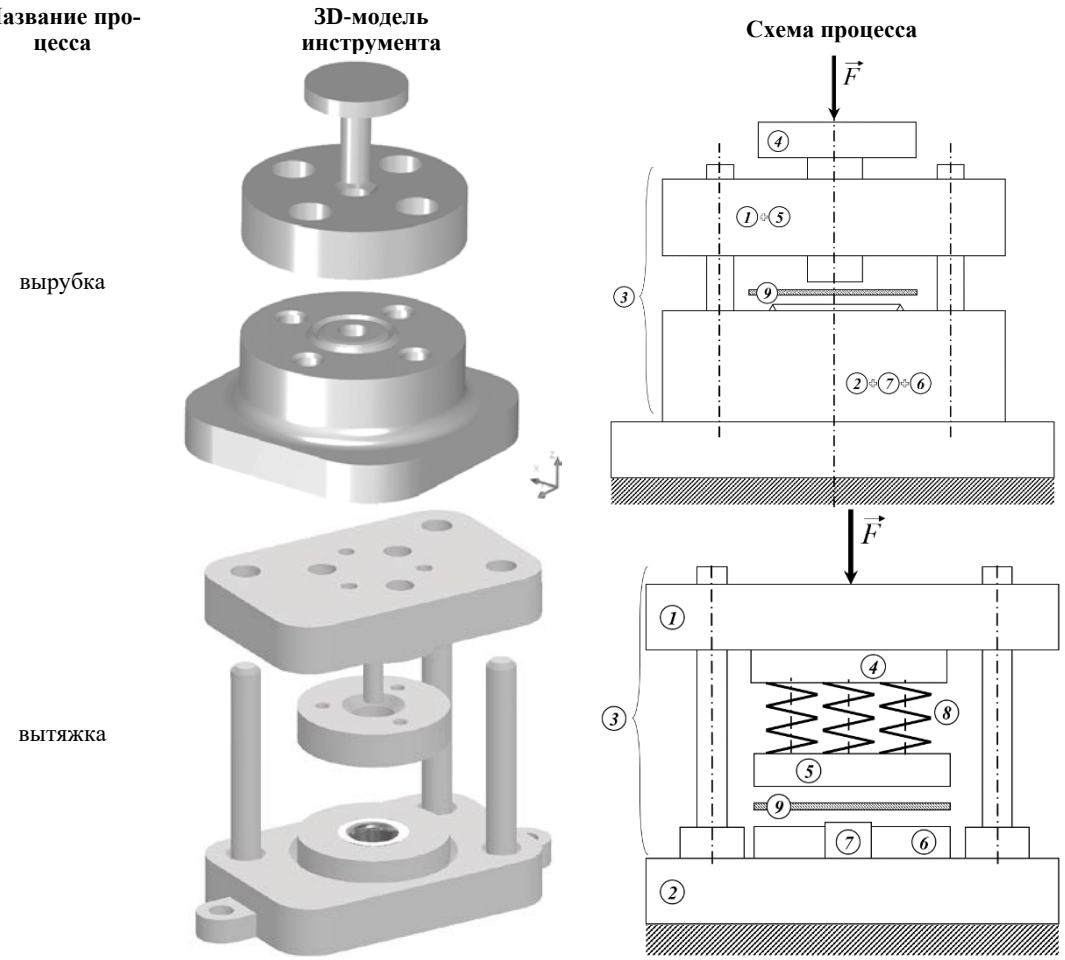


Рис. 3. 3D-модели и схемы исследуемых процессов: 1 – верхняя плита; 2 – нижняя плита; 3 – направляющие втулки и колонки и/или стяжные элементы; 4 – пуансон; 5 – прижим; 6 – матрицедержатель; 7 – матрица; 8 – упругий элемент (пружина); 9 – листовая заготовка

После проектирования выполнялась подготовка управляющей программы 3D-принтера в слайсерах, при этом применялись следующие программы в зависимости от технологии 3D-печати: 3DXpert – для DMLS, 3DLAM Slicer – для SLM, Ultimate Cura – для FFF, Halot Box – для LCD. В табл. 1 показаны применяемые материалы и технологии печати.

Таблица 1

Оборудование, материалы и виды пост-обработки

Технология печати	Название 3D-принтера	Материал	Вид пост-обработки
DMLS	3D Systems ProX 320 DMP	✓ BT6; ✓ AlSi10Mg (аналог АК9)	термообработка, удаление поддержек; снятие заусенцев; шлифование; точение; калибровка отверстий; обработка бормашинкой; нарезка резьбы; установка усилителей резьбы
SLM	3DLAM Mini	✓ 03Х17Н12М2	
SLM	LiM-X260E	✓ 316L (аналог 03Х17Н14М3)	
FFF	Anycubic Kobra 2	✓ ПЭТГ	удаление поддержек; снятие заусенцев; шлифование наждачной бумагой и/или бормашинкой; калибровка отверстий; установка резьбовых втулок
LCD	Creality Halot One	✓ базовый фотополимер (БФП); ✓ керамоподобный фотополимер (КПФП).	промывка в воде (БФП) или изопропиловом спирте (КПФП); отверждение в УФ-печи; удаление поддержек; снятие заусенцев; шлифование наждачной бумагой и/или бормашинкой; калибровка отверстий; установка резьбовых втулок

Изготовленные детали деформирующего инструмента подвергали доводочным операциям (постобработке), согласно табл. 1, после чего выполнялась сборка инструмента. На рис. 4 показаны результаты сборки полимерного и металлического инструментов. В штампах предусматривалась центральная съёмная часть для замены формообразующей и разделительной матриц, что позволяло работать с четырьмя значениями коэффициента подобия (λ), определяемого, как отношение текущего диаметра пуансона к базовому. За базовый диаметр был принят диаметр пуансона, равный 8 мм. Рассматривался следующий ряд коэффициентов подобия: 1; 0,5; 0,25 и 0,125.

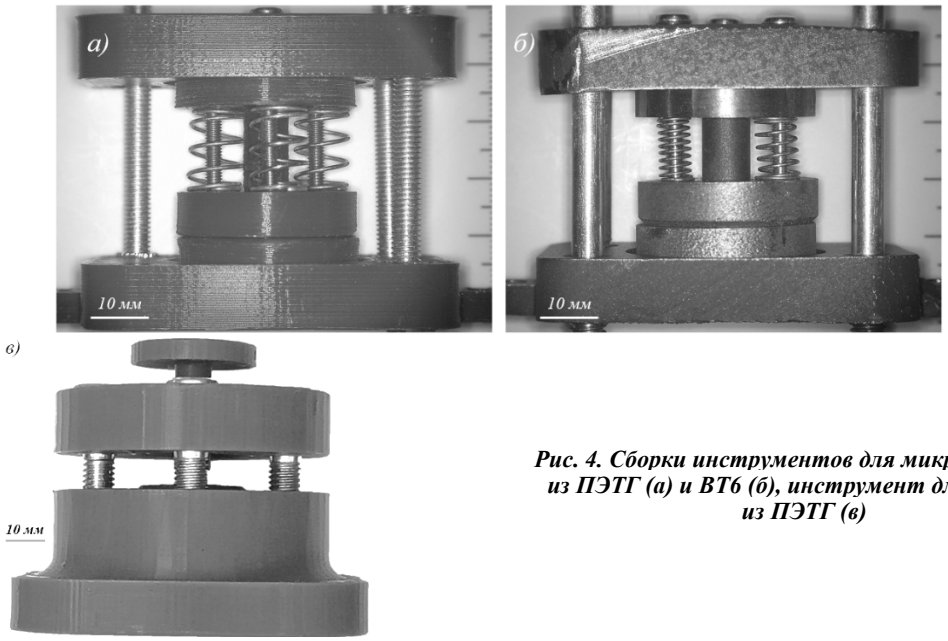


Рис. 4. Сборки инструментов для микровытяжки из ПЭТГ (а) и ВТ6 (б), инструмент для вырубки из ПЭТГ (в)

Точность изготовления инструмента. По результатам 3D-печати выполнялся контроль отдельных деталей и подсборок штампа. Для этого применялся бесконтактный способ, 3D-сканирование на основе инфракрасного структурированного подсвета, с применением 3D-сканера RangeVision Neopoint. Были выделены три группы деталей: основные (опорные плиты, матрицедержатель, прижим), пуансоны и матрицы. На заключительном этапе, полученные фактические, полигональные (stl-) модели сравнивались в программе GOM Inspect с исходной CAD-геометрией и определялась карта отклонений геометрических размеров (КОГР). Рассмотрим некоторые этапы проектирования инструмента для изготовления осесимметричной детали, типа «Стаканчик», с применением КЭМ.

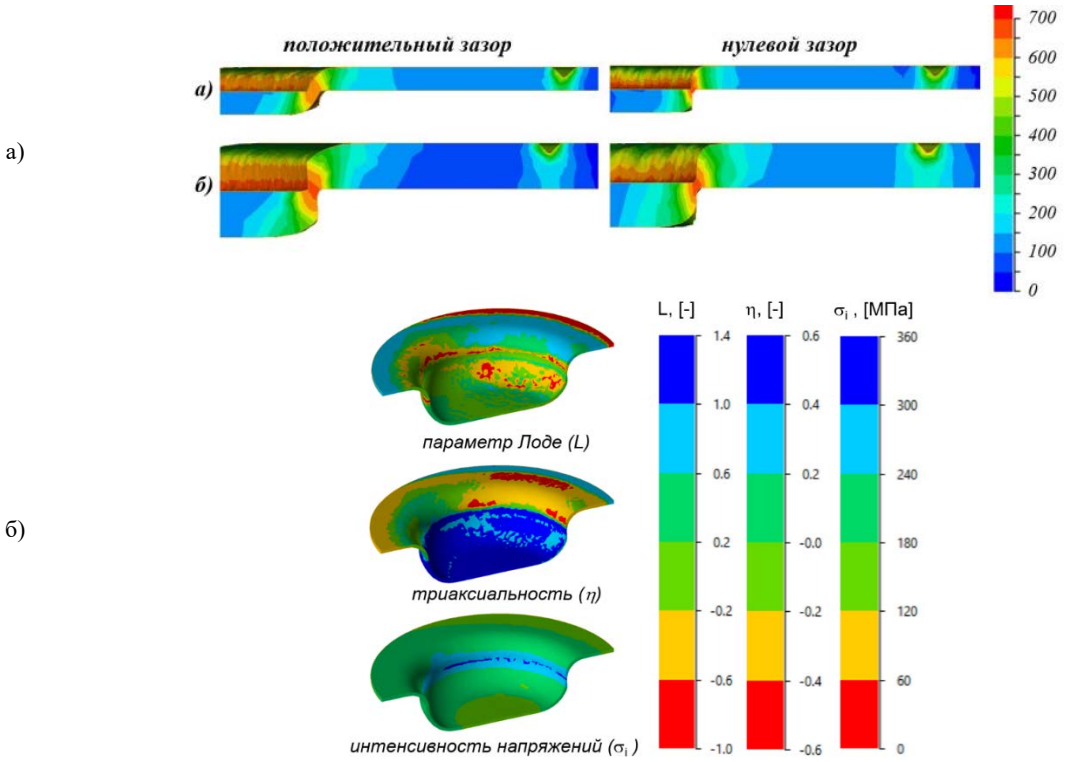


Рис. 5. Поля интенсивности напряжений (по Мизесу) для: микровырубки латунной заготовки из Л80 (а) и микровытяжки медной заготовки из М1 (б)

Разделительная операция. Материалом для формообразующей операции вытяжки является либо полоса, либо круглая листовая заготовка. Для получения круглой заготовки необходимо получить её в отдельном штампе, который проектировался для случая нулевого (δ=0 мм), а также небольшого положительного зазора (δ=0,05 мм). Моделирование осуществлялось в программе Abaqus Student Edition, с ограничением количества узлов сетки до 1000. На рис. 5а показаны результаты КЭМ разделительной операции листовой заготовки толщиной S_0 = 100 мкм из латуни Л80 (верхний ряд) и толщиной S_0 = 200 мкм (нижний ряд). Видно, что даже такое небольшое смещение приведёт к разделению материала по направлению, совпадающему с максимальными значениями напряжений по Мизесу. И в большей части качество операции будет зависеть от точности изготовления инструмента [6].

Изготовление матриц формообразующего инструмента. Моделирование процесса микровытяжки выполнялось в программе QForm Cloud.

Представленные на рис. 5б результаты микровытяжки стаканчика из круглой листовой заготовки ∅15 мм, с применением модели исчерпания ресурса запаса пластичности Лэфема-Кокрофта-О, демонстрируют, что при смещении пуансона в плоскости листа даже на 50 мкм в двух направлениях возникает неравномерность напряжений в стенке, что приводит к её преждевременному утонению и разрушению. Данное смещение обусловлено возможной неточностью позиционирования пуансона и матрицы на этапе сборки. Сдвиг заготовки, обусловленный несоосностью с пуансоном и с матрицей, также приводит к неравномерному втягиванию материала. Всё это оказывает существенную роль на возникновение дефектов, типа фестонов и трещин на детали. По результатам механических испытаний на одноосное растяжение было установлено, что заготовки из латуни и меди имеют анизотропию свойств, величина которой различна. Это обстоятельство также оказывает влияние на образование вышеупомянутых дефектов.

После получения круглой заготовки выполняется операция вытяжки. Для формообразующей операции вытяжки основной рабочей частью инструмента является сменная матрица. Были изготовлены пакеты сменных матриц по двум технологиям 3D-печати (рис. 6). Геометрия матрицы состоит из базовой цилиндрической части и ребра (красный прерывистый сплайн), заходное ребро матрицы или ЗРМ, сглаживание которого определяло плавность затекания материала в полость матрицы.

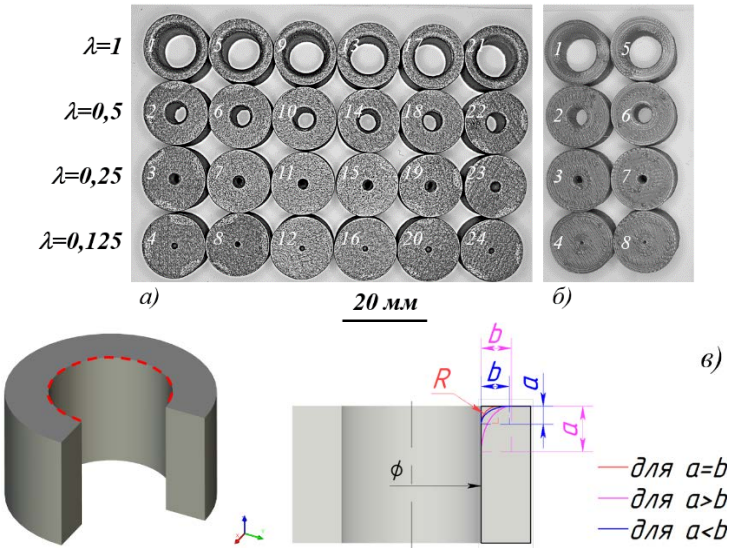


Рис. 6. Вытяжные матрицы, изготовленные по технологиям DMLS из ВТ6 (а) и FFF из ПЭТГ (б), характеристика ЗРМ (в).

Всего рассматривалось 24 варианта исполнения ЗРМ для четырёх значений коэффициента подобия (λ=1; 0,5; 0,25 и 0,125): матрицы с №1 по №8 выполнялись по характеристики a=b, с №9 по №16 – по a<b, с №17 по №24 – по a>b. После отрезки металлических матриц от поддержек, соединяющих опорную плиту с прототипами, нижняя грань матрицы торцевалась. На рис. 7 показана поверхность в области ЗРМ для четырёх первых номеров матриц. Видно, что контактная поверхность матрицы с заготовкой помимо регулярной шероховатости имеет локальную направленную полосчатость. Каналы у матрицы №3 и №4 – несквозные. Удаление несвязанного титанового порошка из небольших отверстий вытряхиванием и выдуванием недостаточно, требуется механическая обработка. Для матриц из ПЭТГ возможно получить сквозные отверстия диаметром менее 2 мм, однако точность изготовления ЗРМ и диаметр отверстия сильно отличаются от заданных чертежом. Кроме этого, поверхность имеет топографию, отличную от той, которая наблюдается на поверхности металлических матриц.

На рис. 8а и 8б показаны вытяжные пуансоны. Поверхность инструментов отличаются друг от друга, причём более равномерная топография наблюдается при λ=1. На рис. 8в и 8г показаны вырубные пуансоны, после 20 циклов нагружения. Видны износ и смятие поверхностей в области рабочих кромок. Сравнивая исходную CAD-модель с фактической stl-моделью, полученной по технологии 3D-сканирования, можно сказать, что смятие кромок составило 0,2 мм, при заданном поле допуска ±0,1 мм (рис. 9). На основании инструментов цифровой метрологии была выполнена оценка величины зазора между матрицей и пуансоном вырубного инструмента из 316L, который равнялся 30…80 мкм. Вырубка заготовок пуансоном с острым ребром (рис. 8в) выполняется для заготовки из меди М1 и алюминия А5 с полным отделением от исходной заготовки, а для заготовки из латуни Л63 – наблюдалось неполное разделение материала с оставлением перемычки толщиной макс. 3,1 мм. Для полимерного пуансона с острым ребром (рис. 8г) полное разделение материала наблюдается для А5, а в случае М1 и Л63 – остаются перемычки толщиной 3,7…4 мм.

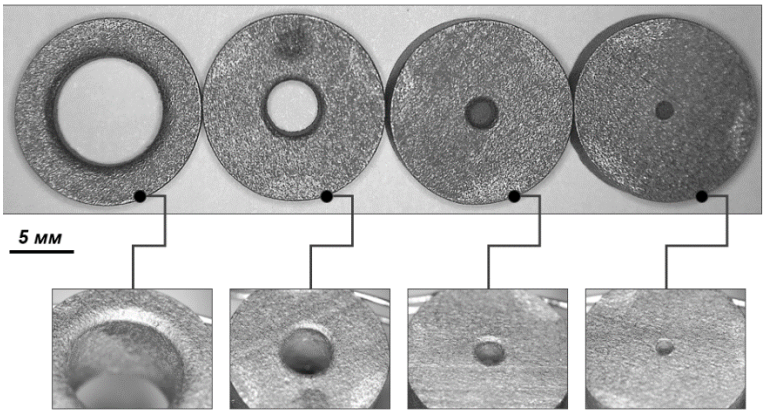


Рис. 7. Вытяжные матрицы, изготовленные по технологии DMLS из ВТ6

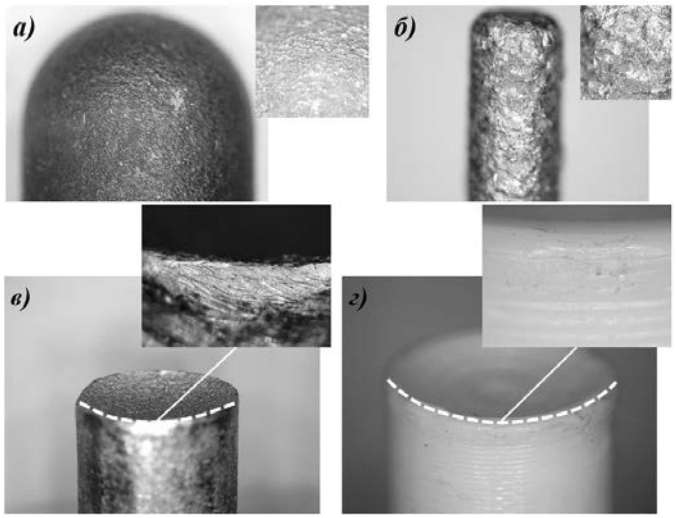


Рис. 8. Рабочие части: вытяжных пуансонов из ВТ6 при λ=1 (а) и λ=0,125 (б), вырубных пуансонов из 316L (в) и ПЭТГ (г)

На рис. 9 показано изменение размеров рабочей кромки вырубного пуансона, износ которой составляет порядка 0,3 мм. На карте годности по полю допуска видно, что рабочая кромка и часть пуансона находятся вне поля допуска ±0,1 мм.

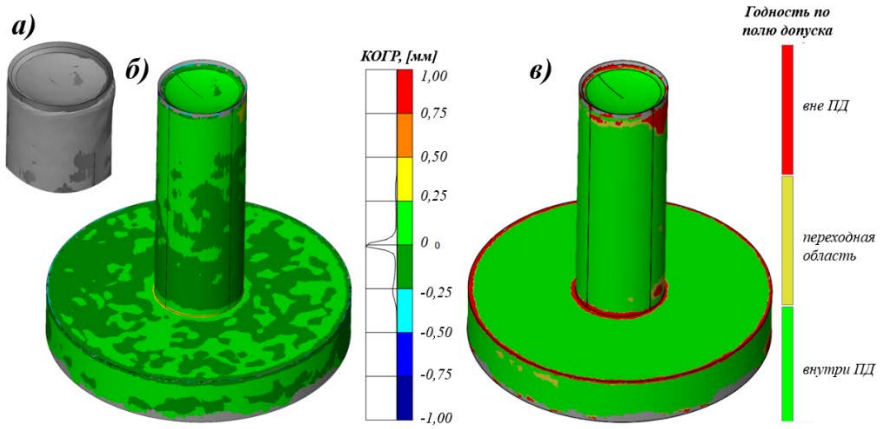


Рис. 9. Карта отклонений геометрических размеров вырубного пуансона из 316L: совмещение кромок CAD- и stl-моделей (а), величины отклонений размеров (б) и карта годности по полю допуска ±0,1 мм (в)

Обсуждение результатов исследования. Результаты исследования показывают, что инструменты могут быть получены по наиболее распространённым технологиям 3D-печати. Каждая из рассмотренных технологий требует выполнения своих доводочных операций, необходимость в которых обусловлена технологическими ограничениями, не позволяющими изготавливать миниатюрные детали, сопоставимые по качеству с изделиями макроуровня.

Износ поверхности наглядно демонстрируется результатами КЭМ. Однако, результаты микроскопии показывают реальную картину износа, отличную от результатов КЭМ. Это обстоятельство указывает на необходимость введения поправочных коэффициентов в модель износа, используемую при КЭМ. Более точные результаты

можно получить при помощи картирования поверхности по результатам элементного анализа, возможно получить схожее представление износа поверхности, но данная работа является весьма кропотливой, так как снимок поверхности имеет небольшие габаритные размеры, что потребует необходимость панорамной съёмки на электронном микроскопе, перед проведением картирования.

По результатам измерений шероховатости поверхности определено изменение значений для поверхностей деталей из ВТ6 – Ra=1,43…6,63 мкм и Rz=7,6…22,18 мкм, а для полимерных деталей – Ra=0,286…6,7 мкм и Rz=1,44…22,73, на длинах измерения 0,25…2,5 мм. Значение весьма велики и могут быть причиной царапин на поверхности изготавливаемых деталей. С другой стороны, за счёт такого технологического текстурирования поверхности площадь общей поверхности контакта будет снижена, что также значительно снизит коэффициент трения на контактной поверхности «заготовка-инструмент» и, соответственно, уменьшит влияние трения на результат вытяжки.

Результаты моделирования разделительной операции показывают, что для латуни Л80 не требуется специальных условий. Однако, на практике оказалось, что отделение заготовки от отхода после вырубки происходит с трудом, с образованием небольшого мостика, удерживающего заготовку. Наоборот, заготовки из медных и алюминиевых сплавов отделяются от отхода хорошо.

При моделировании микровытяжки стаканчика на результат оказывает влияние как толщина материала, так и неравномерность зазора, которая может быть вызвана неточностью обработки деформирующего инструмента, его сборки или позиционирования заготовки. Места разрушений хорошо определяются как по полям интенсивности напряжений, так и по параметру Лоде-Надаи.

Выводы. Технологии 3D-печати могут быть применены для изготовления инструмента для разделительной и формоизменяющей операций. При проектировании 3D-моделей необходимо учитывать технологические напуски с учётом точности изготовления, обусловленной технологией 3D-печати, и припуски под механическую обработку. Рассмотрение технологии с разных точек зрения (компьютерное моделирование, эксперименты, цифровая метрология и аналитические исследования) позволяют значительно продвинуться в изучении технологических особенностей процессов, в которых контроль над технологией процесса в силу малости размеров деталей не доступен человеку в полном объёме.

Список литературы

1.Bauer J., Malone P., Cost Estimating Challenges in Additive Manufacturing, 2015 Workshop Proceedings, International Cost Estimating and Analysis Association, 2015. [Электронный ресурс] URL: https://www.iceaaonline.com/wp-content/uploads/2015/06/MM01-Paper-Bauer-Additive-Manufacturing.pdf (дата обращения: 15.09.2024).

2.S. Malbašić, B. Nedić, A. Đorđević, S. Živković, The role of the cost quality in additive manufacturing, Journal of Engineering, Management and Information Technology, Vol. 1, No. 1, 2023. P. 11-18. DOI: 10.61552/JEMIT.2023.01.002.

3.Rickenbacher L., Spierings A., Wegener K. An integrated cost-model for selective laser melting (SLM), Rapid Prototyping Journal, Vol. 19, Isse 3, 2013. P. 208–214. DOI:10.1108/13552541311312201.

4.Shimizu T., Yang M., Manabe K. Impact of Surface Topography of Tools and Materials in Micro-Sheet Metal Forming. Metal Forming - Process, Tools, Design. 2012. DOI: 10.5772/48296.

5.Cold Micro Metal Forming, eds. Frank Vollertsen, Sybille Friedrich, Bernd Kuhfuß, Peter Maaß, Claus Thomy, Hans-Werner Zoch, Research Report of the Collaborative Research Center “Micro Cold Forming” (SFB 747). Bremen. Germany. DOI: 10.1007/978-3-030-11280-6.

6.Петров М.А., Чан Д.Х., Методика и шаги проектирования процесса микровытяжки листовых заготовок, труды XXXV Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС-2023), 2023. Москва: ИМАШ РАН. С. 83 – 89.

Петров Михаил Александрович, канд. техн. наук, доцент, petrovma_mospolytech@mail.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Чан Динь Хынг, аспирант, tranhung.bk56@gmail.com, Россия, Москва, Московский политехнический университет

APPLICATION OF 3D-PRINTING TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING OF MICROFORMING TOOLS FOR FORMING AND TRIMING OPERATIONS OF SMALL-SIZED SHEET PARTS

M.A. Petrov, D.H. Tran

The paper deals with the application of additive technologies or 3D-printing of stamping tools for the subsequent micro-deformation of thin sheet metal blanks. Tools are made from individual parts that are then assembled together. Unique parts have been produced from polymer and metal materials. The complexity of the parts geometry does not affect the manufacturing accuracy due to the technological characteristics of the equipment. It is shown that the manufactured tool has deviations from the initial dimensions limited by drawings, has a surface roughness depends on the printing technology. To guarantee high specified accuracy during tools’ manufacturing it is recommended to provide technological and machining tolerances.

Key words: micro-deformation, size effect, surface roughness, additive technologies, DMLS, FFF, LCD, ABAQUS, QForm.

Petrov Mikhail Alexandrovitch, candidate of technical sciences, docent, petrovma_mospolytech@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Tran Dinh Hung, postgraduate, tranhung.bk56@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

УДК 621.763:621.77:539.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-614-615

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИХ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ

В.А. Коротков, А.Н. Чуканов, Е.В. Цой, А.А. Фролов

В данной статье предложена оригинальная методика расчёта характеристик неоднородности анизотропных материалов. В их качестве использовали образцы порошкового жаропрочного сплава типа Inconel 718, изготовленные по технологии селективного лазерного сплавления (SLM,), которые подвергали испытанию на статическое растяжение. Методика базируется на совместном использовании в расчёте параметров кривых упрочнения, построенных по результатам определения интенсивности истинных напряжений и деформаций в отдельных микрообъёмах образцов. В качестве таких микрообъёмов использовали поперечные сечения делительной сетки, нанесенной на поверхность образцов. Сечения находились на различном расстоянии от неподвижного захвата испытательной машины, что позволило судить о развитии неоднородности на различном расстоянии от места захвата до момента локализации и разрушения образца. Информацию о геометрии ячеек делительной сетки, изменявшуюся в процессе растяжения, получали из анализа изображений поверхности образцов, полученных в ходе фотофиксации эксперимента. В качестве характеристик неоднородности анизотропных изделий определяли показатели неоднородности материала по механическим свойствам и неравномерности пластического течения материала, при фиксированных значениях интенсивности напряжений.

Ключевые слова: Inconel 718, SLM, коэффициент анизотропии, кривые упрочнения неоднородность механических свойств, неравномерность пластического течения.

Введение. Характеристики механических свойств анизотропных изделий (листового и калиброванного проката, изделий технологии *SLM*) важны для разработки оптимальных режимов обработки полуфабрикатов и эксплуатации готовых деталей [1-4]. В соответствии с ГОСТ 11701-84 («Металлы. Методы испытаний тонких листов на растяжение») к таким характеристикам относят коэффициент пластической анизотропии *R* (параметр Ланкфорда) и неравномерность пластической деформации А. Указанные характеристики определяют на основании измерений геометрии рабочей части испытуемых образцов, выполненных штангенциркулем и микрометром.

В представляемой работе предложено усовершенствовать стандартную методику, заменив приборные измерения фотограмметрией [5] - измерением геометрии ячеек делительной сетки, нанесённой на поверхность образца, выполняемой на цифровых фотоизображениях указанной сетки [6].

Преимуществом такого подхода является более качественное определение параметров анизотропии и неоднородности механических свойств. Оно достигается за счёт использования в расчётах *R* и *A,* вместо единичных значений истинных напряжений и деформаций, массивов значений интенсивностей истинных напряжений и деформаций, полученных из анализа фотоизображений, сделанных с заданным шагом в режиме in situ, непосредственно в ходе испытаний [7-9].

Анализ динамики *R* при помощи фотофиксации локальных деформаций [7-9] позволяет изучать характер и скорость упрочнения, как во всём изделии, так и в его отдельных его микрообъёмах [10]. Наряду с этим анализ *R* даёт возможность оценить влияние анизотропии на формирование неоднородности материала в макро- и микрообъёмах изделия.

Целью работы являлась разработка оригинальной методики расчёта неоднородности материала по механическим свойствам и неравномерности пластического течения в анизотропных материалах в ходе растяжения образцов.

Материал и методика испытаний. Объектами исследования являлись плоские образцы (100х10х2мм) порошкового жаропрочного сплава 08ХН53БМТЮ (аналог *AISI* Inconel 718), изготовленные по *SLM*-технологии в вертикальном направлении относительно платформы 3*d*-принтера *SLM*280 2.0*HL*.

В зоне расчетной длины образцов лазером наносили делительную сетку [7,8] с ячейками размером 1х1 мм по всей поверхности (рис.1).

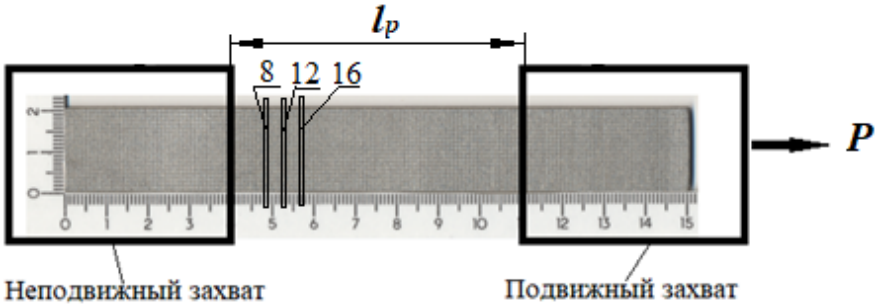


Рис. 1. Расчетная длина l_p образца с делительной сеткой и микрообъёмами различных поперечных сечений между захватами машины

Каждый ряд ячеек рассматривали как поперечное сечение, начальная площадь и размеры которого известна. Номер поперечного сечения (№№ 8,12,16) соответствовал расстоянию этого сечения от неподвижного захвата испытательной машины в миллиметрах (рис.1). Исследовали локальный участок образца, объёмом равным начальной площади поперечного сечения, умноженной на размер ячеек ряда в продольном направлении. Каждое поперечное сечение образца имело 10 ячеек по ширине, и одну по длине.

Образцы подвергали одноосному растяжению на испытательной машине Р5-ПК с постоянной скоростью перемещения захватов 5 мм/мин. на воздухе при комнатной температуре с записью графика «нагрузка-перемещение».

Процесс нагружения образцов до разрушения фиксировали с помощью специализированного фотооборудования (цифровой фотокамеры *Canon EOS 5D Mark IV* с 35-миллиметровой полнокадровой матрицей), позволявшего получать изображение деформируемых образцов *SLM* в непрерывном (*.mov*) и интервальном режимах (1…10 сек) в форматах 4*k* с разрешением (6720x1480) и (3840x2160 пикс.), соответственно. Полученные изображения обрабатывали в графических редакторах [5,8]. Процесс фотофиксации испытаний занимал время ~130 сек. В интервале этого времени в течение 100 сек наблюдали изменение размеров ячеек поперечных сечений. Исследовали изменения размеров локального участка образца с поперечным сечением шириной *b*, толщиной *S* и длиной *l* (рис. 2).

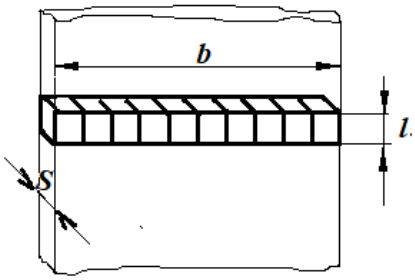


Рис. 2. Размеры локального участка образца с поперечным сечением объёмом bsl

При синхронизации моментов фотофиксации размеров ячеек с графиком «нагрузка-перемещение» учитывали особенности деформирования различных поперечных сечений, расположенных на участках расчётной длины образца. Для поперечных сечений, расположенных вне области образования «шейки» в месте разрушения, деформации прекращаются одновременно с началом формирования «шейки». В области образования самой «шейки» пластическое течение образца продолжается до его разрушения. Учитывая эту особенность пластического деформирования, на графике рис. 3 откладывали отрезок перемещения подвижного захвата, зафиксированного в течение 100 сек от момента начала образования шейки в сторону начала пластического деформирования, и делили этот участок графика на интервалы перемещения подвижного захвата, соответствующие интервалам в 10 сек.

На рис. 3 показан график «нагрузка-перемещение» при растяжении с участками перемещения подвижного захвата, соответствующие интервалам времени 10 сек. По оси нагрузки определяли её величину P_i для каждого интервала времени растяжения.

Видно (рис. 3), что подвижный захват испытательной машины в момент пластического деформирования образца переместился на 9,85 мм и, следовательно, при скорости перемещения подвижного захвата испытательной машины *V*=5 мм/мин время растяжения *t* составило 1,97 мин или 118 сек. В работе использовали данные о начальных (до растяжения) размерах ячеек, исследованных сечений, по ширине сечения b_o и длине ячейки l_o и их конечных размерах: b_k и l_k в этом сечении в процессе растяжения через интервал времени 10 сек. С их использованием рассчитывали истинные деформации в поперечных сечениях $\varepsilon_{bi} = ln\frac{b_o}{b_i}$, $\varepsilon_{li} = ln\frac{l_o}{l_i}$ и, в соответствии с условием неразрывности деформаций в форме Сен-Венана [9], определяли деформации по толщине $\varepsilon_{si} = \varepsilon_{li} - \varepsilon_{bi}$.

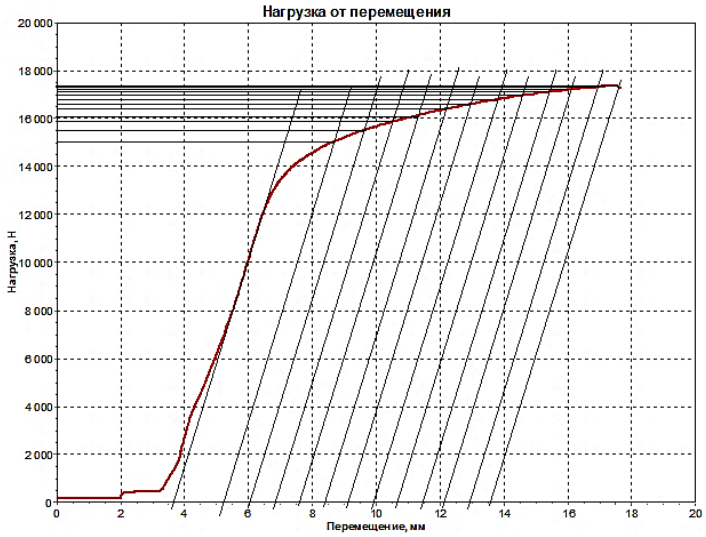


Рис. 3. График «нагрузка-перемещение» растяжения образца порошкового сплава Inconel 718

По полученной деформации ε_{si} находили текущую толщину s_i и площадь F_i в исследованных поперечных сечениях в зависимости от времени растяжения. Коэффициенты анизотропии *R* в указанных сечениях рассчитывали [9-11] по формуле (1)

$$R = \varepsilon_{bi}/(\varepsilon_{li} - \varepsilon_{bi}). \quad (1)$$

В процессе растяжения образца происходит упрочнение его материала. Деформационное упрочнение исследовали на основе анализа кривых упрочнения, построенных в координатах: интенсивность напряжение σ_i^* интенсивность деформации ε_i^*, которые рассчитывали в соответствии с [12] по зависимостям (2 и 3):

$$\sigma_i^* = \sqrt{\frac{3}{2}\left(\frac{1+R}{2+R}\right)}\sigma i, \tag{2}$$

$$\varepsilon_i^* = \sqrt{\frac{2}{3}\left(\frac{2+R}{1+R}\right)}\varepsilon i, \tag{3}$$

где σ_i и ε_i истинные напряжение и деформации, соответственно, определяемые как отношения нагрузки, измеренной по графику «нагрузка-перемещение», к площади поперечного сечения образца F_i в процессе растяжения, а деформация - по зависимости $\varepsilon_i = ln\frac{F_o}{F_i}$.

Результаты экспериментов. После измерения размеров ячеек делительной сетки в микрообъёмах исследованных поперечных сечений №№ 8,12,16 (рис.1) были рассчитаны общие размеры этих микрообъёмов (рис.2) в поперечном и продольном направлении. Было установлено, что размеры различных сечений образца индивидуальны, монотонно уменьшаются по ширине и возрастают по длине в процессе растяжения. Это позволило по линейному характеру изменения размеров рассматриваемых поперечных сечений получить соответствующие графики. На рис. 4 приведены графики изменения размера ячеек образца в поперечном сечении № 8 при растяжении.



а ***б***

Рис. 4. Изменение размеров поперечного сечения № 8: в продольном (а) и поперечном (б) направлениях в процессе растяжения

Проведённая с использованием метода наименьших квадратов статистическая обработка результатов измерений позволила определить закономерности изменения размеров каждого поперечного сечения.

Анализ результатов экспериментов. Из графиков (рис. 4) видно, что в процессе растяжения длина ячеек l_i монотонно и равномерно увеличивается, а в поперечном направлении ширина поперечного сечения b_i уменьшается. Указанные зависимости с погрешностью аппроксимации не более 1% были описаны линейными уравнениями (4-9):

Для сечения №8

$$l_i = 0{,}0019t + 1\ . \tag{4}$$

$$b_i = 9{,}3446 - 0{,}0109t \tag{5}$$

Для сечения №12

$$l_i = 0{,}0017t + 1{,}0016\ . \tag{6}$$

$$b_i = 9{,}3486 - 0{,}0101t \tag{7}$$

Для сечения №16

$$l_i = 0{,}0018t + 1{,}0032\ . \tag{8}$$

$$b_i = 9{,}3284 - 0{,}0112t \tag{9}$$

Полученные уравнения позволили определить истинные деформации сечений №№ 8,12,16 в любой момент растяжения в продольном направлении ε_{li} с использованием уравнений (10,11, 12):

в сечении №8

$$\varepsilon_{l8} = ln\frac{l_i}{1} = ln\frac{0{,}0019t+1}{1}, \tag{10}$$

в сечении №12

$$\varepsilon_{l12} = ln\frac{l_i}{1{,}0016} = ln\frac{0{,}0017t+1{,}0016}{1{,}0016}\ , \tag{11}$$

в сечении №16

$$\varepsilon_{l16} = ln\frac{l_i}{1{,}0032} = ln\frac{0{,}0018t+1{,}0032}{1{,}0032}\ . \tag{12}$$

и поперечном направлении ε_{bi} (13, 14, 15):

в сечении №8

$$\varepsilon_{b8} = ln\frac{b_o}{b_i} = \frac{9{,}3446}{9{,}3446-0{,}0109t}, \tag{13}$$

в сечении №12

$$\varepsilon_{b12} = ln\frac{b_o}{b_i} = \frac{9{,}3486}{9{,}3486-0{,}0101t}, \tag{14}$$

в сечении №16

$$\varepsilon_{b16} = ln\frac{b_o}{b_i} = \frac{9{,}3284}{9{,}3284-0{,}0112t}\ . \tag{15}$$

Коэффициенты анизотропии R_i в указанных сечениях рассчитывали по формуле (1). Результаты расчёта коэффициентов анизотропии в моменты растяжения с интервалом времени 10 сек. в поперечных сечениях приведены в табл. 1.

По графику «нагрузка-перемещение» (рис. 3) определяли значения нагрузки, соответствующие моментам фоторегистрации процесса растяжения. По известным размерам ячеек рассчитывали толщину s_i, ширину b_i и площадь F_i поперечных сечений. Это позволило рассчитать истинные напряжения и деформации, формировавшиеся в каждом микрообъёме поперечных сечений в определённый момент процесса растяжения. В табл. 2 приведены результаты расчётов истинных напряжений и деформаций, а также размеров поперечных сечений.

Таблица 1

Коэффициенты анизотропии в поперечных сечениях в моменты растяжения с интервалом времени 10 сек

τ, сек	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Истинная деформация ε в сечение №8, отн. ед.											
ε_l	0	0,019	0,037	0,055	0,073	0,091	0,108	0,125	0,142	0,158	0,174
$\varepsilon_в$	0	0,011	0,022	0,033	0,044	0,056	0,067	0,079	0,090	0,102	0,114
ε_s	0	0,008	0,016	0,023	0,029	0,035	0,041	0,046	0,051	0,056	0,060
R	0	**1,38**	**1,41**	**1,46**	**1,51**	**1,57**	**1,63**	**1,70**	**1,76**	**1,83**	**1,91**
Истинная деформация ε в сечение №12, отн. ед.											
ε_l	0	0,018	0,033	0,050	0,066	0,082	0,097	0,112	0,127	0,142	0,157
$\varepsilon_в$	0	0,010	0,022	0,031	0,042	0,052	0,063	0,074	0,085	0,096	0,108
ε_s	0	0,008	0,013	0,019	0,024	0,029	0,034	0,038	0,042	0,046	0,049
R	0	**1,24**	**1,61**	**1,67**	**1,73**	**1,79**	**1,86**	**1,93**	**2,01**	**2,09**	**2,18**
Истинная деформация ε в сечение №16, отн. ед.											
ε_l	0	0,017	0,033	0,050	0,066	0,081	0,097	0,112	0,127	0,142	0,157
$\varepsilon_в$	0	0,010	0,021	0,032	0,043	0,054	0,065	0,076	0,088	0,099	0,111
ε_s	0	0,006	0,012	0,018	0,023	0,028	0,032	0,036	0,040	0,043	0,046
R	0	**1,67**	**1,75**	**1,80**	**1,88**	**1,96**	**2,03**	**2,12**	**2,21**	**2,31**	**2,42**

Таблица 2

Истинные напряжения, деформации и размеры поперечных сечений

Сечение №		**Толщина сечения, мм**									
8	2	1,984	1,969	1,955	1,943	1,931	1,92	1,91	1,90	1,892	1,884
12	2	1,984	1,975	1,963	1,952	1,943	1,933	1,925	1,917	1,91	1,904
16	2	1,987	1,976	1,965	1,955	1,946	1,937	1,929	1,922	1,916	1,91
Ширина сечения, мм											
8	9,54	9,436	9,333	9,230	9,127	9,024	8,921	8,818	8,715	8,612	8,509
12	9,52	9,421	9,324	9,227	9,130	9,033	8,936	8,839	8,742	8,645	8,548
16	9,54	9,444	9,344	9,244	9,144	9,044	8,944	8,844	8,744	8,644	8,544
Площадь сечения, мм^2											
8	19,08	18,724	18,380	18,049	17,730	17,424	17,127	16,839	16,561	16,29	16,033
12	19,04	18,688	18,412	18,115	17,826	17,547	17,277	17,014	16,760	16,514	16,274
16	19,09	18,769	18,464	18,164	17,876	17,597	17,326	17,065	16,809	16,562	16,323
Нагрузка, Н											
	15152	15515	15879	16061	16424	16848	16970	17152	17273	17364	17394
Истинное напряжение в сечении, МПа											
8	794,2	828,6	863,9	889,8	926,3	967,0	990,8	1018,6	1043,0	1065,8	1084,9
12	795,9	830,2	862,4	886,6	921,4	960,1	982,2	1008,1	1030,6	1051,5	1068,8
16	793,8	826,6	860,0	884,2	918,8	957,4	979,4	1005,1	1027,3	1048,4	1065,6

В процессе растяжения происходит упрочнение материала, характер которого зависит от влияния анизотропии. Поэтому помимо истинных напряжений и деформаций необходимо находить по зависимостям (2) и (3) интенсивности напряжений и деформаций σ_i^* и ε_i^*. Результаты расчётов приведены в табл. 3

Таблица 3

Интенсивности напряжений и деформаций σ_i^* и ε_i^* от времени испытаний τ

τ, сек	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Сечение №	**Интенсивность напряжения σ_i^*,** МПа									
8	851,6	889,5	918,9	959,4	1004,9	1032,8	1065,7	1094,4	1122,1	1146,3
12	845,4	898,1	926,2	965,4	1008,9	1035,5	1066,1	1093,6	1119,4	1141,7
16	863,5	902,0	929,6	969,5	1013,8	1040,1	1071,2	1098,6	1125,2	1148,0
Нагрузка, Н										
	15515	**15879**	**16061**	**16424**	**16848**	**16970**	**17152**	**17273**	**17364**	**17394**
Интенсивность деформации ε_i^*, отн. ед.										
8	0,018	0,036	0,036	0,071	0,087	0,104	0,119	0,135	0,150	0,167
12	0,018	0,032	0,048	0,063	0,078	0,092	0,106	0,120	0,134	0,147
16	0,016	0,032	0,047	0,062	0,077	0,091	0,105	0,119	0,132	0,146

Путём статистической обработки полученных результатов (табл. 2 и 3) получали графики и уравнения аппроксимации (рис. 5) зависимостей R_i от истинной деформации ε_i в микрообъёмах поперечных сечений.

сечение 8 $R = 1{,}2771 + 3{,}4519\varepsilon_i$

сечение 12 $R = 1{,}4342 + 4{,}5761\varepsilon_i$

сечение 16 $R = 1{,}551 * 5{,}2669^{\varepsilon_i}$

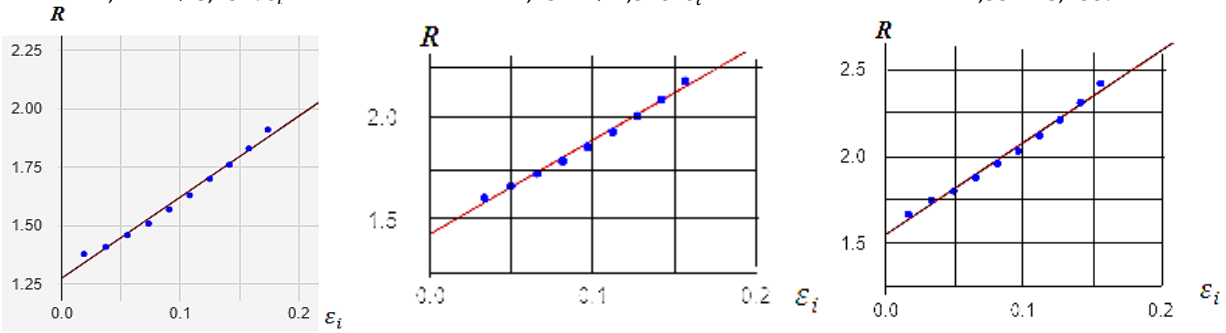


Рис. 5. Изменение коэффициента анизотропии R в поперечных сечениях в зависимости от деформации

Из рис. 5 видно, что коэффициенты анизотропии R в каждом поперечном сечении индивидуальны, например, в поперечном сечении №16 коэффициент анизотропии примерно на 30% больше, чем в поперечном сечении №8 и этот фактор оказывает значительное влияние на характер упрочнения материала в сравниваемых микрообъёмах образца.

На рис. 6 приведены кривые упрочнения материала в микрообъёмах поперечных сечений №№ 8,12,16. Они показывают характер упрочнения в сечениях в виде зависимостей значений интенсивности напряжения σ_i^* от интенсивности деформации ε_i^*.

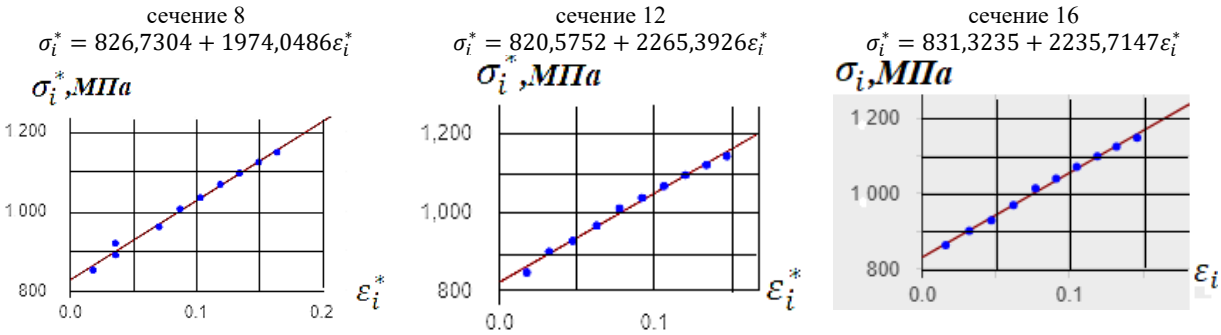


Рис. 6. Кривые упрочнения материала в поперечных сечениях

Установили, что линейный характер кривых упрочнения с погрешностью ~ 1% описывается линейными уравнениями. Коэффициенты уравнений были индивидуальны для каждого поперечного сечения.

В поперечном сечении №16 коэффициент больше, чем в поперечном сечении №8, примерно на 30%. Это обстоятельство учитывали в дальнейшем при определении неоднородности механических свойств материала.

Определение неоднородности механических свойств с помощью семейств кривых упрочнения. Расчётным путём с помощью полученных линейных уравнений регрессии кривых упрочнения определяли значения интенсивности напряжений при заданных интенсивностях деформаций.

Если материал однороден по механическим свойствам, то при заданных значениях интенсивности деформаций значения интенсивности напряжений должны быть одинаковыми по величине. Если же интенсивности напряжений различны, то материал является неоднородным по механическим свойствам.

Неоднородность механических свойств материала приводит к **неравномерности пластического течения** материала [12]. В микрообъёме образца с меньшими значениями интенсивности напряжений пластическое течение материала протекает с большей скоростью, чем в микрообъёме с большими значениями интенсивности напряжений.

Таким образом, характеристики неоднородности материала могут оцениваться двумя видами показателей неоднородности: 1−показателем неоднородности материала по механическим свойствам $\mathrm{H}_{\varepsilon i}^{\sigma}$, который определяют по дисперсии значений интенсивности напряжения при фиксированной (заданной) деформации и 2 – показателем неравномерности пластического течения материала $\mathrm{H}_{\sigma i}^{\varepsilon}$, который определяют по дисперсии значений интенсивности деформации при фиксированных значениях интенсивности напряжений. В работе указанные показатели рассчитывали соответственно по зависимостям (16,17).

$$\mathrm{H}_{\varepsilon i}^{\sigma} = \left|\frac{\sigma_{imax}^{*} - \sigma_{imin}^{*}}{\sigma_{i\mathrm{cp}}^{*}}\right| \mathrm{x}100,\ \% \qquad (16)$$

$$\mathrm{H}_{\sigma i}^{\varepsilon} = \left|\frac{\varepsilon_{imaxi}^{*} - \varepsilon_{imin}^{*}}{\varepsilon_{i\,\mathrm{cp}}^{*}}\right| \mathrm{x}100,\ \% \qquad (17)$$

Для определения показателя неоднородности материала по механическим свойствам $\mathrm{H}_{\varepsilon i}^{\sigma}$ на основе уравнений аппроксимации кривых упрочнения (рис.5) определили значения интенсивности напряжения σ_i^* при заданных интенсивностях деформаций ε_i^*. Результаты расчётов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Интенсивность напряжений σ_i^* и показатель неоднородности $\mathrm{H}_{\varepsilon i}^{\sigma}$ от заданных интенсивностей деформаций ε_i^*

Ист. деф. ε_i^*	0,05	0,10	0,15	0,20
Сечение №	**Интенсивность напряжения σ_i^*, МПа**			
8	925,4	1024,1	1122,8	1221,5
12	933,9	1047,1	1160,4	1273,7
16	943,1	1054,9	1166,7	1278,4
$\sigma_{\mathrm{ср}}$, МПа	934,1	1042,0	1150,0	1257,9
Показатель неоднородности мех. свойств $\mathrm{H}_{\varepsilon i}^{\sigma}$, %				
	1,90	2,96	3,82	4,52

Из табл. 4 следует, что при заданных значениях интенсивности деформации ε_i^* значения интенсивности напряжения σ_i^* в разных микрообъёмах поперечных сечений неодинаковые. Следовательно, материал образца имеет неоднородность механических свойств, которую оценивали показателем неоднородности $\mathrm{H}_{\varepsilon i}^{\sigma}$ по уравнению (16).

В табл. 4 приведены значения показателя неоднородности в макрообъёме между поперечными сечениями №8 и №16. Установили, что с приращением интенсивности деформации $\Delta\varepsilon_i^* = 0{,}05$ приращение напряжений $\Delta\sigma_i^*$ постоянно в каждом поперечном сечении, но индивидуально по величине. Так, в поперечном сечении №8 $\Delta\sigma_i^*$ =98,7 МПа, а в поперечном сечении №16 $\Delta\sigma_i^*$ =111,8 МПа, что на 13,3% больше. При этом показатель неоднородности механических свойств растёт.

На рис. 7 показан характер изменения показателя неоднородности в зависимости от интенсивности деформации и степенное уравнение аппроксимации.

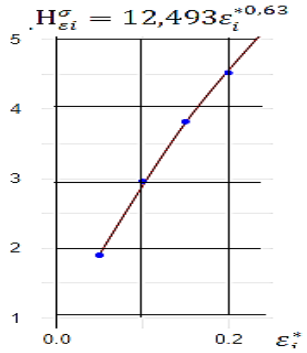


Рис. 7. Зависимость показателя неоднородности механических свойств от интенсивности деформации (ср. ошибка аппроксимации 0,5%)

Исследовали влияние неоднородности механических свойств на распределение истинных деформаций при пластическом течении. Для этого, используя уравнения аппроксимации (рис. 5) кривых упрочнения, решали их относительно интенсивности деформаций ε_i^*. Рассчитывали полученные значения при заданных интенсивностях напряжений σ_i^*.

Результаты расчётов приведены в табл. 5. Из табл. 5 следует, что в менее прочном по механическим характеристикам сечении №8 возникали значительно большие интенсивности деформаций, чем в более прочном сечении №16 при заданных значениях интенсивности напряжений.

Таблица 5

Интенсивность деформаций в микрообъёмах сечений и неравномерность пластического течения при заданных интенсивностях напряжений

Значения σ_i^*, МПа	950	1050	1150	1250
Сечение №	**Интенсивность деформаций ε_i^***			
8	0,0624	0,1131	0,1638	0,2144
12	0,0571	0,1013	0,1454	0,1896
16	0,0531	0,0978	0,1425	0,1873
$\sigma_{ср}$, МПа	0,0575	0,1041	0,1506	0,1971
Неравномерность пластической деформации $H_{\sigma i}^{\varepsilon}$, %				
	16,2	14,7	14,1	13,7

При приращении интенсивности напряжений $\Delta\sigma_i^* = 100$ МПа приращение интенсивностей деформаций в этих сечениях было постоянным, но индивидуальным. Так, в сечении №8 $\Delta\varepsilon_i^* = 0{,}0507$, тогда как в сечении №16 $\Delta\varepsilon_i^* = 0{,}0447$, т.е. на 14,7% меньше. При этом относительная характеристика неравномерности пластической деформации $H_{\sigma i}^{\varepsilon}$ уменьшалась с ростом интенсивности напряжений. Результаты статистической обработки по методу наименьших квадратов показали, что с погрешностью аппроксимации ~ 0,5% полученная зависимость (рис. 8) описывается уравнением (18):

$$H_{\sigma i}^{\varepsilon} = \mathbf{56{,}52 - 0{,}0686\sigma_i^* + 0{,}0000275\sigma_i^{*2}} \qquad (18)$$

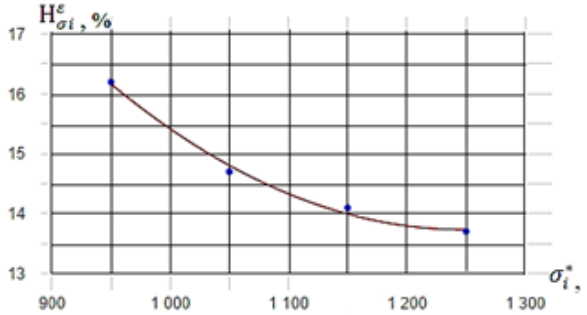


Рис. 8. Зависимость неравномерности пластической деформации от интенсивности напряжения

При анализе табл. 3 и 4 было установлено, что имеет место взаимосвязь и примерное равенство между отношениями приращении интенсивности напряжений и деформаций: $\frac{\Delta\varepsilon_{imax}^*}{\Delta\varepsilon_{imin}^*} \approx \frac{\Delta\sigma_{imax}^*}{\Delta\sigma_{imin}^*} \approx H_{\sigma i}^{\varepsilon}(13{,}3 \div 14{,}7)$.

Выводы. В результате проведённых исследований установлено следующее.

1. Зафиксирован рост показателя неоднородности механических свойств материала образца $H_{\varepsilon i}^{\sigma}$ в зависимости от интенсивности деформации и снижение показателя неравномерности пластической деформации $H_{\sigma i}^{\varepsilon}$ с ростом интенсивности напряжений.

2. Установлено наличие взаимосвязи значений отношений приращений интенсивности напряжений и деформаций, а также их примерное равенство.

3. В менее прочном по механическим характеристикам сечении №8 зафиксированы значительно большие интенсивности деформаций, чем в более прочном сечении №16 при заданных значениях интенсивности напряжений.

4. Неоднородность материала зависит от величины разброса значений коэффициентов анизотропии в поперечных сечениях $\Delta R=R_{max}-R_{min}$.

5. Способ фото и видеофиксации обеспечивает возможность с достаточной точностью реализацию предложенной методики определения показателей неоднородности механических свойств и неравномерности пластической деформации в процессе растяжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-29-00433 «Волновая деформация и ее взаимосвязь с ортотропией структуры и физико-механических свойств в изделиях селективного лазерного сплавления» (https://rscf.ru/project/№ 23-29-00433/).

Список литературы

1. Kunze K., Etter T., Grässlin J., Shklover V. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM) // Mater. Sci. Eng. A. 2015. Vol. 620. P. 213-222.

2. Song B., Dong S., Coddet P., Liao H., Coddet C. Fabrication of NiCr alloy parts by selective laser melting: columnar microstructure and anisotropic mechanical behavior // Mater. and Design. 2014. Vol. 53. P. 1-7.

3. Popovich A. A., Sufiiarov V.Sh., Borisov E.V., Polozov I.A. Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by SLM and subsequent heat treatment // Key Eng. Mater. 2015. Vol. 651-653. P. 665-670.

4. Чуканов А.Н. Анизотропия физико-механических свойств при послойном лазерном синтезе // «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов», посвящ. 150-ю акад. А.А. Байкова: Сб. научн. статей МНПК. (18.09.2020). Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. С. 244-247.

5. Чуканов А.Н., Цой Е.В., Фролов А.А. Использование фотограмметрии в технологической подготовке обучающихся вузов // Современные материалы, техника и технологии, 2024. № 2(53). С. 43-48.

6. Чуканов А.Н., Добровольский Н.Н., Цой Е.В., Яковенко А.А. Математические методы наблюдения волновых процессов при деформации изделий 3d технологии» // Известия Юго-Западного государственного университета. Техника и технологии. - 2023. Т.13 (4). С. 32 - 42.

7. Чуканов А.Н., Яковенко А.А., Цой Е.В., Гончаров С.С. Коэффициент Ланкфорда и скорость деформации в изделиях селективного лазерного сплавления // 2 Всеросс. нац. научно-техн. конф. «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении (ТМ-05)». Воронеж: ВГТУ, 2024. С. 382-387.

8. Чуканов А.Н., Цой Е.В., Фролов А.А. Разработка технологии регистрации и анализа локализованной деформации материалов // Современные материалы, техника и технологии, 2024. № 2(53). С. 49-51.

9. Андреев В.И. Механика неоднородных тел: уч. пос. М.: Изд-во «Юрайт». 2015. 255 с.

10. Чуканов А.Н., Коротков В.А., Яковенко А.А., Цой Е.В., Фролов А.А. Определение коэффициента анизотропии и скорости локальной деформации в аддитивных сплавах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 3. С. 224-229.

11. Чуканов А.Н., Коротков В.А., Яковенко А.А., Цой Е.В., Фролов А.А. Характер упрочнения аддитивных сплавов высокой прочности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 4. С. 421 - 426.

12. Чуканов А.Н., Коротков В.А., Яковенко А.А., Цой Е.В., Фролов А.А. Влияние анизотропии на характер упрочнения в аддитивных сплавах высокой прочности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, №3. С. 19–29. DOI: 10.21869/2223-1528- 2024-14-3-19-29.

13. Матвеев А.Д. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х Т. / Ред. совет: Е.И. Семёнов и др. Т. 1. Материалы и нагрев. Испытания технологических свойств листовых материалов. М.: Машиностроение, 1985. С. 154-163.

Коротков Виктор Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, vak-2003@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чуканов Александр Николаевич, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, alexchukanov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого университет,

Цой Евгений Владимирович, аспирант, tsoyev@tsput.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого университет,

Фролов Артём Алексеевич, студент, froloff2003@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого университет

ESTIMATION OF INHOMOGENEITY PARAMETERS OF ANISOTROPIC PRODUCTS BASED ON THE INTENSITY OF THEIR DEFORMATION BY STRETCHING

V.A. Korotkov, A.N. Chukanov, E.V. Tsoi, A.A. Frolov

In this article, an original method for calculating the characteristics of inhomogeneity of anisotropic products is proposed. As such, samples of a powder heat-resistant alloy of the Inconel 718 type, manufactured using selective laser fusion (SLM) technology, were used. The technique is based on the joint use of hardening curves in the calculation of parameters, based on the results of determining the intensity of true stresses and deformations in individual micro-volumes of samples. Cross sections of a dividing grid applied to the surface of the samples were used as such micro-volumes. The sections were located at different distances from the stationary grip of the test machine, which allowed us to judge the development of heterogeneity at different distances from the site of localization and destruction of the sample. Information about the geometry of the cells of the dividing grid, which changed during the stretching process, was obtained during the analysis of images of the surface of samples obtained during the photofixation of the experiment. As characteristics of the heterogeneity of anisotropic products, the indicators of the heterogeneity of the material were determined by the mechanical properties and the plastic flow of the material, at fixed values of stress intensity.

Key words: Inconel 718, SLM, anisotropy coefficient, hardening curves, heterogeneity of mechanical properties, heterogeneity of plastic flow.

Korotkov Viktor Anatolievich, candidate of technical sciences, docent, vak_2003@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Chukanov Alexander Nikolaevich, doctor of technical sciences, docent, leading researcher, alexchukanov@yandex.ru, Russia, Tula, L.N. Tolstoy Tula State Pedagogical University,

Tsoi Evgeny Vladimirovich, postgraduate, tsoyev@tsput.ru, Russia, Tula, L.N. Tolstoy Tula State Pedagogical University,

Frolov Artiom Alekseevich, student, froloff2003@yandex.ru, Russia, Tula, L.N. Tolstoy Tula State Pedagogical University

УДК 621.77
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-621-622

КОНТРОЛЬ И ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

О.Г. Ветков

В статье подробно рассматриваются этапы и методы контроля качества, начиная с входного анализа сырья и заканчивая финальными испытаниями готовой продукции. Особое внимание уделено использованию методов неразрушающего контроля и современных инструментов для измерений геометрических параметров. Рассматривается внедрение компьютерного моделирования технологических процессов, что позволяет сократить риск брака, оптимизировать параметры штамповки и значительно улучшить качество изделий. Моделирование на базе программного обеспечения, например, QForm, становится важным инструментом прогнозирования и предупреждения дефектов. Подчеркивается важность комплексного подхода, включающего совершенствование методов контроля, модернизацию оборудования и повышение квалификации персонала. В статье представлены примеры аналитических данных, подтверждающих возможность снижения вероятности образования дефектов благодаря таким подходам.

Ключевые слова: штамповка, контроль качества, методы неразрушающего контроля, компьютерное моделирование, оптимизация технологических процессов, механические испытания, дефекты изделия.

Контроль качества изделий штамповочного производства является важной частью в обеспечении надежности и долговечности выпускаемой продукции. Штамповка - это процесс обработки металлов давлением, при котором заготовка пластически деформируется, приобретая заданную форму и размеры [1-3]. Для гарантии соответствия готовых изделий требованиям чертежей и технических условий необходимо проводить тщательный контроль на всех этапах производства.

Контроль качества штампованных изделий начинается с входного контроля материалов. Проверяются механические свойства, в том числе и анизотропия листовых заготовок, химический состав и геометрические параметры заготовок [4-5]. Это позволяет избежать использования некачественного сырья, адаптировать производство и снизить риск брака.

В процессе самой штамповки необходимо контролировать параметры технологического процесса: усилие, температура штампа и заготовки, скорость деформации, точность позиционирования заготовки, соосность заготовки и инструмента, количества смазочного материала [6-7]. Современные штамповочные автоматы оснащены датчиками и системами мониторинга, которые отслеживают эти параметры в реальном времени и позволяют оперативно выявлять отклонения.

На первом этапе проводится визуальный контроль изделий для выявления поверхностных дефектов, таких как царапины, вмятины, заусенцы. Дефектные изделия отбраковываются или, если возможно, направляются на исправление.

После проводится контроль геометрических параметров изделий, проверяются размеры, форма, отклонения. Для этого используются различные измерительные инструменты: штангенциркули, микрометры, шаблоны, нутромеры, угломеры, кронциркуль, радиусомеры и пр. Также применяются бесконтактные методы контроля, такие как оптические системы и координатно-измерительные машины. Помимо этого, применяются автоматизированные системы контроля размеры и формы.

Важным этапом является выявление скрытых дефектов, таких как трещины, расслоения, внутренние разрывы. Для этого применяются методы неразрушающего контроля: ультразвуковая дефектоскопия, рентгеноскопия, капиллярная дефектоскопия. Эти методы позволяют обнаруживать дефекты без нарушения целостности изделия.

Для подтверждения механических свойств материала после штамповки проводятся испытания на растяжение, твердость, ударную вязкость. Результаты испытаний сравниваются с требованиями стандартов и технических условий.

Результаты контроля качества документируются и анализируются. На основе анализа разрабатываются корректирующие и предупреждающие действия, направленные на устранение причин брака и повышение качества продукции.

Однако контроль качества является не единственной задачей, помимо этого, требуется изначальный процесс повышения качества изделия, который может быть обеспечен за счет технического обслуживания оборудования, повышение квалификации оборудования, помимо этого, в настоящее время активно применяются компьютерные моделирования процессов получения деталей.

За последние десятилетия компьютерные технологии совершили колоссальный скачок, что открыло новые горизонты для оптимизации промышленных процессов. Моделирование процессов штамповки с использованием специализированного программного обеспечения стало революцией в отрасли. Основные преимущества применения компьютерных моделей включают в себя множество пунктов. В том числе предварительный анализ процесса. Компьютерное моделирование позволяет смоделировать весь процесс штамповки ещё до того, как он начнётся на производственной линии. Это помогает определить возможные дефекты, такие как трещины, складки, утонение металла или искажения геометрии. Также с помощью моделирования можно точно настроить параметры, такие как усилие, температура, скорость деформации и подготовка материала. Это уменьшает количество пробных итераций, что экономит время и ресурсы. Компьютерное моделирование помимо прочего способствуют повышению уровня точности изделий. За счёт точного расчёта воздействия на металл оптимизируется процесс, что способствует более равномерной деформации металла и повышению качества конечной продукции.

Так, например, далее приведены возможности компьютерного моделирования для повышения качества изделия, с помощью программы Qform возможно определение вероятности образования дефектов (рис. 1) и параметра повреждаемости Кокрофт-Латам (рис. 2). [8-10].

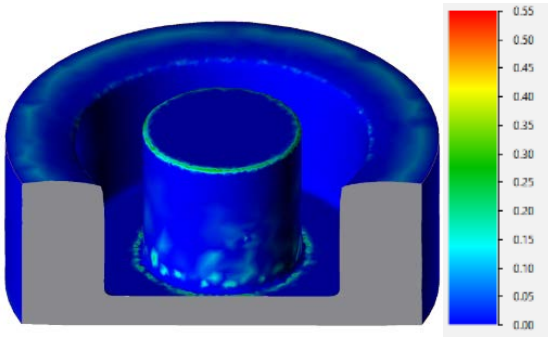


Рис. 1. Вероятность дефектов на поверхности изделия

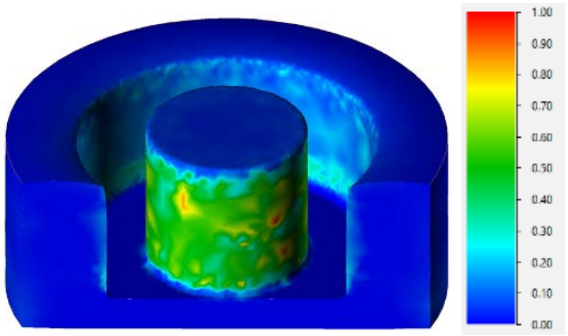


Рис. 2. Повреждаемость материала

Данные исследования позволяют оптимизировать процесс, изменить геометрию или параметры процесса для снижения вероятности брака в дальнейшем производстве. Таким образом контроль качества изделий штамповочного производства - это комплексная задача, требующая применения современных методов и средств контроля, а также высокой квалификации персонала. Однако, помимо этого, для обеспечения высокого качества изделий необходимы также и компьютерные моделирования.

Список литературы

1. Иванов К.М., Звонцов И.Ф., Серебреницкий П.П. Разработка технологических процессов изготовления деталей общего и специального машиностроения. М.: Лань, 2018. 696 с.

2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

3. Семёнов Е.И., Кондратенко В.Г., Ляпунов Н.И. Технология и оборудование ковки и объемной штамповки. М.: Машиностроение, 1978. 311 с.

4. Сметанин В.И., Соколов С.А., Колегов С.А. Диагностика дефектов, разрушений и брака на машиностроительном предприятии. М.: ТНТ, 2011. 192 с.

5. Контроль качества продукции в машиностроении: под редакцией А.Э. Артеса. М.: «Издательство стандартов», 1980. 272 с.

6. Губич Л.В., Ковалев М.Я., Паткевич Н.И. Внедрение на промышленных предприятиях информационных технологий поддержки жизненного цикла продукции. М.: Беларуская Навука, 2013. 190 с.

7. Ознобишин Н.С., Лурве А.М. Технический контроль в механических цехах. М.: «Высшая школа». 1979. 221 с.

8. Травин В.Ю., Исаева А.Н. Повреждаемость материала в стенке детали при вытяжке с утонением толстостенных осесимметричных заготовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 10. С. 334-340. EDN RVSJNB.

9. Самсонов Н.А., Благочиннов Р.С. Повреждаемость материала при вытяжке плоской квадратной заготовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 11. С. 449-453. EDN RMJGPF.

10. Пугаев П.В. Комплексное компьютерное моделирование объемной штамповки детали с фланцем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 2. С. 310-312. EDN DKLDVP.

Ветков Олег Геннадьевич, магистрант, vetkov22@bk.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Научный руководитель: Недошивин Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CONTROL AND IMPROVEMENT OF QUALITY OF STAMPING PRODUCTS

O.G. Vetkov

The article examines in detail the stages and methods of quality control, from the incoming analysis of raw materials to the final testing of finished products. Particular attention is paid to the use of non-destructive testing methods and modern tools for measuring geometric parameters. The introduction of computer modeling of technological processes is considered, which allows reducing the risk of defects, optimizing stamping parameters and significantly improving the quality of products. Modeling based on software, for example, QForm, is becoming an important tool for predicting and preventing defects. The importance of an integrated approach, including improving control methods, modernizing equipment and improving the skills of personnel, is emphasized. The article presents examples of analytical data confirming the possibility of reducing the likelihood of defects due to such approaches.

Key words: stamping, quality control, non-destructive testing methods, computer modeling, optimization of technological processes, mechanical testing, product defects.

Vetkov Oleg Gennadievich, master's, vetkov22@bk.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Scientific advisor: Nedoshivin Sergey Vladimirovich, doctor of technical science, professor, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7.04
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-623-624

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ГОФРИРОВАНИИ ОБЖИМОМ

С.С. Яковлев, А.А. Шишкина

В статье рассматривается исследование температурных эффектов при холодной штамповке в процессе гофрирования цилиндрических трубчатых заготовок. Рассматриваются физические аспекты, связанные с образованием тепла в результате пластической деформации и трения в зоне контакта между заготовкой и инструментом. В работе проведено компьютерное моделирование в программе QForm для анализа температурных режимов инструмента при различных параметрах обработки. Статья содержит изображения распределения температур на инструменте и табличные данные максимальных температур при различных параметрах обработки. Полученные результаты имеют практическую значимость для оптимизации процессов продольного гофрирования пластического формоизменения. В заключении делаются выводы о том, как меняются температура оправки и матрицы для обжима при разных параметрах процесса, таких как амплитуда гофрирования, толщина заготовки.

Ключевые слова: температура, компьютерное моделирование, гофрирование, продольное, штамповка, обработка металлов давлением, штамповая оснастка, максимальная температура.

В современном производстве металлоизделий холодная листовая штамповка широко применяется для изготовления деталей из листового металла, этот процесс характеризуется высокой скоростью, экономичностью и возможностью получения сложных форм при пластической деформации металла при комнатной температуре [1-3].

К такой технологической операции относится и гофрирование цилиндрической трубчатой заготовки [4], которое основано на частичном обжиме заготовки с получением трубчатого полуфабриката с переменным диаметром стенки. Однако, несмотря на кажущуюся простоту, процесс сопряжен с рядом сложных физических процессов, в том числе и с термическими эффектами. Анализ температуры инструмента при штамповке является одним из факторов для достижения высокого качества изделия и долговечности штамповой оснастки.

Холодная штамповка подразумевает, что металл обрабатывается без значительного нагрева, однако процесс пластической деформации всегда сопровождается выделением тепла в зоне контакта между инструментом и

заготовкой [5-6]. Это связано с диссипацией энергии при деформации металла и трении. Если температура не контролируется, это может привести к множеству проблем [7]:

- Перегрев инструмента: Избыточное тепло способно изменить микроструктуру инструмента, что приводит к его быстрому износу или разрушению.
- Изменения геометрии инструмента или заготовки: Тепловое расширение может вызывать нежелательные отклонения в размерах деталей, что негативно сказывается на точности.

Таким образом, температура инструмента и заготовки влияет как на долговечность оборудования, так и на конечное качество продукции.

Температура инструмента при холодной штамповке растет по ряду причин. Разберем основные из них:

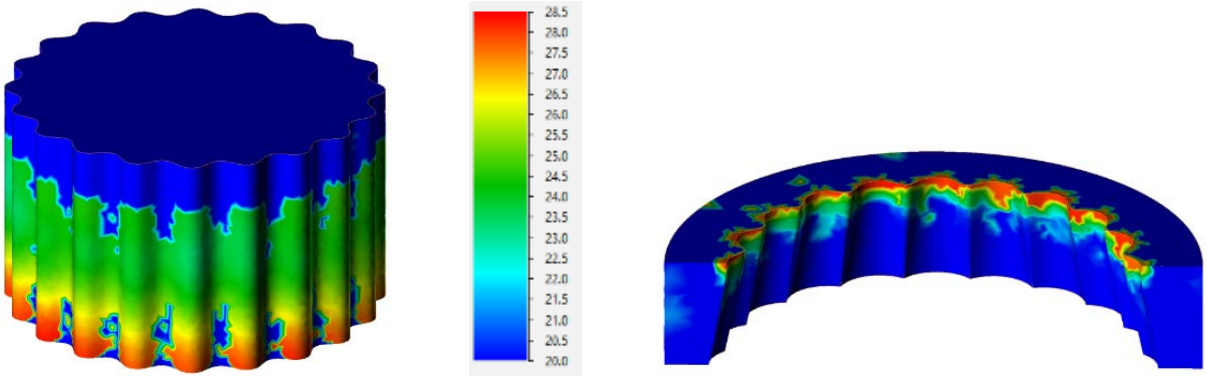
- Энергия пластической деформации: металл деформируется при приложении внешнего усилия, и значительная часть этой энергии преобразуется в тепло.
- Трение: интенсивный контакт поверхности заготовки и инструмента сопровождается трением, из-за которого выделяется дополнительное тепло.
- Высокая частота циклов: при массовом производстве инструменты работают практически без перерывов, что приводит к накоплению тепла.

В данном же случае гофрирования тепло образуется за счет трения и пластического формоизменения. Поэтому были проведены компьютерные моделирования гофрирования трубчатых заготовок внутренним диаметром 100 мм из стали 10. Рассматривалось 9 вариантов гофрирования: при разных толщинах стенки заготовки, а именно 1, 1,5, 2 мм и при разных амплитудах гофрирования - 2, 3 и 4 мм, например, модель изделия получаемого гофрированием с амплитудой 4 мм и толщиной стенки 2 мм приведены на рисунке 1.



Рис. 1. Модель гофрированного полуфабриката

Моделирование проводилось в программе QForm [8-10], и были определены максимальные температуры инструмента (см. табл.) и пример распределения температуры (рис. 2).



а ***б*** ***в***

Рис. 2. Распределение температур на инструменте: а - на оправке, б – шкала, в – на матрице для обжима (в разрезе)

На данном рисунке представлена визуализация температурного распределения на инструменте, который используется в процессе обработки металла. Температура оправки повышается в нижней ее части, температура матрицы же увеличена в районе рабочего пояска матрицы.

Максимальные температуры инструмента

Толщина стенки, мм				
Амплитуда гофр, мм		1	1,5	2
	2	21,7	24,5	26,2
	3	21,9	24,7	26,3
	4	22,1	26,7	29,1

Толщина стенки влияет сильнее на температуру, чем амплитуда гофров. Например, при одинаковой амплитуде 2 мм температура возрастает с 21,7°C (толщина 1 мм) до 26,2°C (толщина 2 мм), что составляет увеличение на 4,5°C или ≈20,74%. Наибольшая температура (29,1°C) достигается при максимальных значениях параметров –

амплитуде 4 мм и толщине стенки 2 мм. Увеличение от минимального значения 21,7°С составляет 7,4°С или ≈34,10%. Таким образом, увеличение геометрических параметров (амплитуды гофр и толщины стенки) приводит к неизбежному росту температуры инструмента во время штамповки, при этом максимальная температура недостаточна для изменения механических характеристик материала и этот фактор оказывает минимальное влияние на весь процесс формоизменения.

Список литературы

1. Яковлев С.С. Ковка и штамповка. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под общ. ред. С. С. Яковлева; ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. Москва: Машиностроение, 2010. 732 с.

2. Голенков В.А., Дмитриев А.М., Кухарь В.Д., Радченко С.Ю., Яковлев С.П., Яковлев С.С. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением. М.: Машиностроение, 2004. 464 с.

3. Бочарова Ю.А. Машиностроение. В 40-а томах. Том IV Машины и оборудование кузнечно-штамповочного и литейного производства. М.: Машиностроение, 2005. 711 с.

4. Шишкина А.А. Обзор программного обеспечения для компьютерного моделирования процессов гофрирования трубчатой заготовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 8. С. 221-223.

5. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

6. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1986. Т.2. Горячая штамповка / Под ред. Е.И. Семенова, 1986. 592 с.

7. Иванов К.М., Звонцов И.Ф., Серебреницкий П.П. Разработка технологических процессов изготовления деталей общего и специального машиностроения. М.: Лань, 2018. 696 с.

8. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением: учебное пособие / А. А. Богатов, Д. А. Павлов, М. В. Ерпалов [и др.] ; под общей редакцией А. А. Богатова; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. 248 с. EDN UUHNSC.

9. QForm. Моделирование процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс] URL: https://qform3d.ru (дата обращения: 21.05.2024).

10. QForm 2D/3D Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением. Версия V8. Начало работы. Часть 1. Начало работы. «КванторФорм», 2016. 112 с.

Яковлев Сергей Сергеевич, ассистент, yakovlev-ss-science@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Шишкина Анастасия Андреевна, аспирант, shishkina5ap@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

TOOL TEMPERATURE ANALYSIS DURING LONGITUDINAL CORRUGATING BY CRIMPING

S.S. Yakovlev, A.A. Shishkina

The article deals with the study of temperature effects during cold stamping in the process of corrugation of cylindrical tubular blanks. The physical aspects related to the formation of heat as a result of plastic deformation and friction in the contact zone between the blank and the tool are considered. The work contains computer modeling in the QForm program to analyze the temperature conditions of the tool at various processing parameters. The article contains images of the temperature distribution on the tool and tabular data on the maximum temperatures at various processing parameters. The obtained results are of practical importance for optimizing the processes of longitudinal corrugation of plastic forming. In conclusion, conclusions are made on how the temperature of the mandrel and the matrix for crimping change at different process parameters, such as the amplitude of corrugation, the thickness of the blank.

Key words: temperature, computer modeling, corrugation, longitudinal, stamping, metal forming, stamping tooling, maximum temperature.

Yakovlev Sergey Sergeevich, assistant, yakovlev-ss-science@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Shishkina Anastasia Andreevna, postgraduate, shishkina5ap@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7; 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-626-627

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МИКРОВЫТЯЖКИ, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

М.А. Петров, Д.Х. Чан

В статье проводится оценка точности изготовления деформирующего инструмента для выполнения микровытяжки. Получена метрологическая информация о точности процесса 3D-печати деталей и подготовки сборок. При помощи инструментов цифровой метрологии выполнено построение карты отклонений геометрических размеров по результатам сравнения исходной и фактической 3D-моделей. Значения отклонений геометрических размеров и формы деталей различаются по технологиям 3D-печати.

Ключевые слова: микродеформирование, коэффициент подобия, цифровая метрология, отклонения размеров, 3D-сканирование, RV 3D Studio, GOM Inspect

Введение. С появлением технологий 3D-печати открылось направление аддитивного производства, формирующееся и по сей день. Согласно ГОСТ Р ИСО/АСТМ 52950-2022 исходным объектом, подходящим для 3D-печати, является цифровая фасеточная модель, получение которой возможно либо на основании прямого твердотельного (CAD-программы) или полигонального (CAGD-программы) моделирования, либо на основе результатов 3D-сканирования, по результатам которого получается облако точек, которые в дальнейшем проходят процедуру полигонизации, одной из разновидностью которой является триангуляция или объединение точек в сетку с базовой ячейкой в виде треугольника. Технологии 3D-сканирования сопровождаются программной частью, которая позволяет обрабатывать облако точек до полигональной модели. Программное обеспечение может включать в себя и модуль оценки геометрических размеров полученной фасеточной модели, проводить сравнение исходной твердотельной геометрии, созданной по чертежу, с геометрией фактической полигональной модели, полученной при помощи 3D-сканирования. Как было показано авторами работы [1], точность соответствия размеров деталей со сложными геометрическими контурами, полученными по традиционным технологиям литья и штамповки, может изменяться в диапазоне 0,05…0,15 мм, зависит от качества полученных 3D-сканов (аппаратное ограничение) и полигонизации точек (умение оператора). И в том, и в другом случае может иметь место и человеческий фактор. Например, неточная калибровка 3D-сканера перед процедурой сканирования и невысокая полигонизация модели. Аппаратная часть 3D-сканеров весьма разнообразна. Существуют две большие группы 3D-сканеров: оптические и лазерные. В первых в качестве источника света выступает светодиодная подсветка, а во-вторых, – лазерная подсветка различного класса мощности. Существуют и другие классификационные признаки деления оборудования, которые более подробно рассматриваются в статье [2].

Технологии 3D-сканирования применяются как для крупных объектов, размерами в несколько десятков и сотен метров, так и для мелких объектов, микроэлектронные компоненты. Определяющим фактором является область интереса (field of interest или сокр. FOV), для которой необходимо провести оценку геометрии (размеры, отклонения). Поэтому не всегда при 3D-сканировании для проведения цифровой метрологии преследуется цель получения полной геометрической информации об объекте.

В исследовании выполнялось 3D-сканирование деталей-представителей, а также подсборка и сборка инструмента для микровытяжки. На основании полученной информации были сделаны выводы о качестве 3D-печати и сборки инструмента.

Проведение 3D-сканирования. Процедура 3D-сканирования на основе инфракрасного структурированного подсвета (ИК-СП) выполнялась с применением аппаратного средства RangeVision Neopoint, а полигонизация облака точек – с применением программного обеспечения RV 3D Studio. В табл. 1 представлены технические характеристики 3D-сканера.

Таблица 1

Технические характеристики RangeVision Neopoint [3]

Параметр	Значение	
Размер области сканирования, мм:	210×130	 Общий вид 3D-сканера (выпуск 2023 г., 1-ое поколение)
Принцип работы:	ИК-СП	
Точность сканирования, мкм:	50	
Разрешение (3D), мкм:	150	
Рабочее расстояние, мм:	200…300	
Режим работы 3D-сканера:	статический и динамический	
Количество камер:		
- монохромная	2	
- цветная	1	

Получение облака точек. Перед выполнением 3D-сканирования выполнялось нанесение белого беспигментного антибликового, матового покрытия Ateco Ghost аэрозольным способом, самоисчезающего через 2…3 часа после нанесения. Основной процесс выполнялся в режиме 3D-сканирования на поворотном столе, который поворачивается посегментно на один полный оборот во время процедуры с шагом, определяемым пользователем. Количество сегментов определяет итоговое количество точек. Согласно рекомендациям производителя, количество сегментов свыше 20 не влияет на увеличение количества точек, а лишь повышает затрачиваемое время на сканирование. Перед основным этапом выполняется калибровка сканера, в конце которой автоматически оценивается отклонение оси поворотного стола.

Подготовка полигональной модели. После выполнения 3D-сканирования появляются сканы, количество которых соответствует заданному количеству оборотов поворотного стола. При правильной калибровке выполняется автоматическая ориентация и совмещение сканов. Однако, было установлено, что автоматическое совмещение сканов осесимметричных объектов размером 15 мм и менее даже при успешной начальной калибровке 3D-сканера в стационарном режиме сканирования не всегда успешно. Это приводит к необходимости ручного совмещения сканов. Чтобы повысить распознаваемость точек и упростить ручное совмещение сканов осесимметричных объектов, не имеющих отличительных особенностей на разных углах поворота столика, были добавлены точечные чёрно-белые маркеры на поверхность столика, по которым сопрягались сканы в режиме ручного выравнивания. На рис. 1 показан пример результата выполнения 3D-сканирования матричной вставки. На рис. 1а показана карта расстояния до объекта или карта глубин. Видно, что сканы были объединены программой, однако круговое расположение маркеров (рис. 1в) вместо их локализации (рис. 1б) указывает на некорректное автоматическое совмещение и требуется переход в ручной режим работы. Процедура получения полигональной модели включает в себя следующие шаги: обработка сканов, финальное совмещение сканов, создание полигональной модели и её экспорт в соответствующий формат (stl, obj, ply и другие).

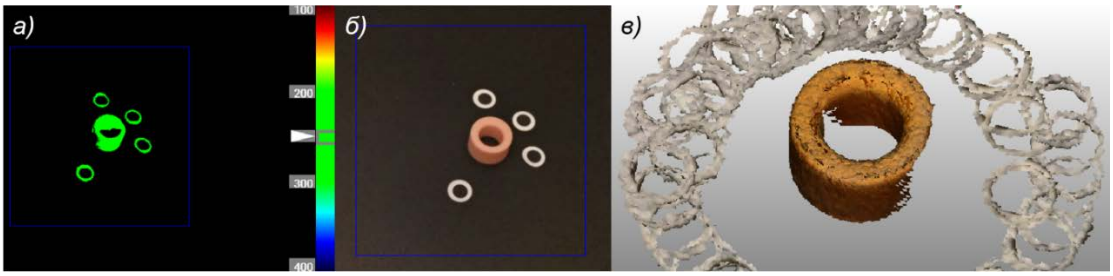


Рис. 1. Сканирование матричной вставки из базового фотополимера (БФП)

Схема микровытяжки. Объекты исследования образуют инструмент для выполнения микровытяжки по схеме «дном вниз», то есть для выполнения операции вытяжки детали «Стаканчик» с размерами менее 10 мм или ∅8 мм и менее. Инструменты были получены при помощи нескольких технологий 3D-печати для разных материалов: прямого лазерного спекания (DMLS, материал: титановый сплав ВТ6), масочная стереолитография (LCD, материал: керамоподобный фотополимер или сокр. КПФП) и экструзионная печать (FFF, материал: ПЭТГ). Матричные вставки съёмные и отличаются друг от друга диаметром отверстия, а также оформлением геометрии заходного ребра матрицы (ЗРМ).

Цифровая метрология. Для выполнения оценки точности полигональной модели её противопоставляют исходной CAD-модели. Для этого в программе GOM Inspect после загрузки обеих моделей проводят их взаимное выравнивание, по результатам которого определяется отклонение при совмещении. На первом этапе выравнивание осуществляется либо по одной точке, либо по трём точкам соответствия, выбранным на поверхностях каждой из 3D-моделей. На втором этапе выполняется локальное наилучшее совпадение геометрии.

После совмещения таким образом, чтобы отклонение составляло минимальное значение, строится карта отклонений геометрических размеров по заданной исходной CAD-модели. В дальнейшем инструментами программы возможно определение размеров и отклонений, построение геометрии коррекции (fitting geometry) по методу Гаусса.

В данной статье рассматривались пять объектов: матричная вставка №1 из КПФП (объект I, ЗРМ скруглено постоянным радиусом R=1,5 мм и имеет отверстие ∅8,2 мм), матричная вставка №5 из ПЭТГ (объект II, ЗРМ скруглено постоянным радиусом R=1,5 мм и имеет отверстие ∅8,1 мм), нижняя опорная плита из ВТ6 (объект III), сборка верхней части металлического инструмента (объект IV), сборка нижней части металлического инструмента с матричной вставкой из КПФП №1 (объект V). Для них, в зависимости от объекта и дополнительно к карте отклонения геометрических размеров (КОГР) и карте годности по полю допуска, определялись следующие показатели: внешний ∅ (внешний диаметр матричной вставки) – показатель I (ПКЗ I), внутренний ∅ (диаметр отверстия матричной вставки) – показатель II (ПКЗ II), соосность отверстия и внешнего контура (матричной вставки) – показатель III (ПКЗ III), параллельность плоскости верхней плиты и плоскости прижима – показатель IV (ПКЗ IV), соосность цилиндрической поверхности матрицедержателя и отверстия матричной вставки – показатель V (ПКЗ V), соосность отверстия и внешнего контура прижима – показатель VI (ПКЗ VI), параллельность плоскости матрицедержателя и поверхности нижней плиты – показатель VII (ПКЗ VII), расстояние между отверстиями по большей стороне нижней плиты – показатель VIII (ПКЗ VIII).

Для оценки работоспособности программы на основании твердотельной CAD-модели была сгенерирована stl-модель объекта I и определены контролируемые показатели, указанные выше. Было установлено, что контрольные показатели ПКЗ, кроме ПКЗ II, имеют нулевое отклонение, лежат в поле допуска. Для ПКЗ II требовалось изменить метод вычисления пределов. По умолчанию установленный двухточечный метод приводил к неточному вычислению отклонения. После выбора метода наилучшего соответствия по Гауссу (GG, best fit) ПКЗ II изменился, пределы отклонение стали равны нулю. Таким образом, программа показывает хорошие результаты и может быть использована для проведения цифровой метрологии рассматриваемых объектов.

В случае метода наилучшей аппроксимации или Гауссовского наилучшего соответствия программа возводит в квадрат отклонения выбранных точек или полигонов на поверхности полигональной модели будущей поверхности аппроксимации. Программа суммирует квадратичные отклонения и меняет возможную поверхность аппроксимации до тех пор, пока эта сумма не станет наименьшей.

Результаты исследования. На рис. 2 показан результат сканирования объекта I, КОГР и годность по полю допуска ±0,1 мм. Размеры по боковой внешней поверхности матричной вставки лежат в пределах симметричного допуска ±0,2 мм, а внутренней поверхности – ±0,3 мм. При этом стоит отметить несимметричность цветового поля, что говорит о небольшой овальности внутренней поверхности.

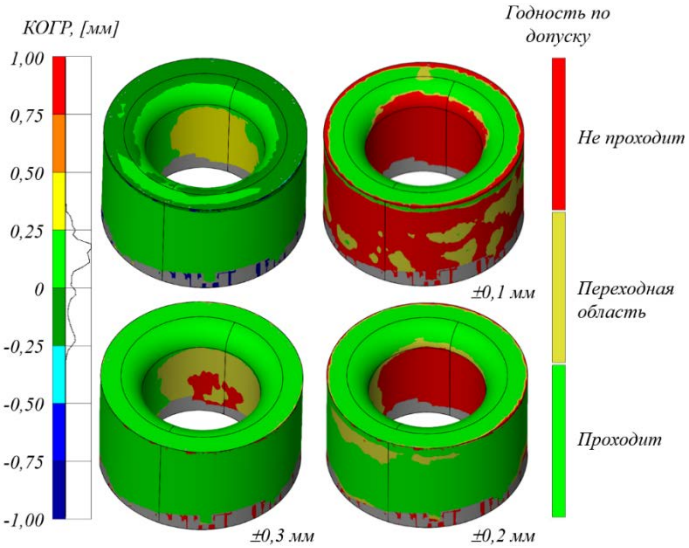


Рис. 2. Результат сканирования объекта I

В табл. 2 показаны численные значения отклонений при финальном совмещении сканов. На рис. 3 представлен результат 3D-сканирования и финальное совмещение сканов объекта III. Согласно результатам измерений, ПКЗ II и VIII для объектов I и III проходят по полю допуска, соответствующему осреднённым значениям совокупности отклонений, связанных с 3D-сканированием (табл. 3).

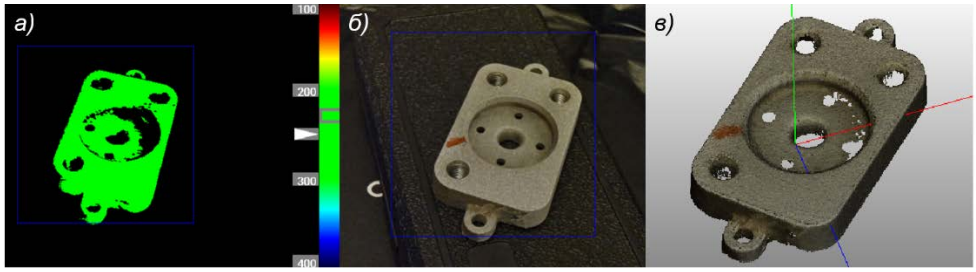


Рис. 3. Сканирование нижней плиты штампа для выдавливания из ВТ6: карта глубин (а), общий вид с камеры (б) и результат автоматического совмещения сканов (в)

Таблица 2

Точность финального совмещения сканов

Объект	Среднее отклонение, мм
I	0,092
II	0,14
III	0,085
IV	0,079
V	0,079

Таблица 3.

Результаты оценки точности изготовления и сборки деталей штампов по контрольным показателям [3]

Объект	Контроль показателя	Номинальное значение/ отклонение	Фактическое значение размера/ отклонения	Попадание в поле допуска ±0,1 мм
I	ПКЗ I	14,0	13,66	нет
	ПКЗ II	8,2	8,3	да
	ПКЗ III	0	+0,31	нет
II	ПКЗ I	14,0	13,44	нет
	ПКЗ II	8,1	8,35	нет
	ПКЗ III	0	+0,23	нет
III	ПКЗ VIII	44,0	44,09	да
IV	ПКЗ IV	0	+0,99	нет
	ПКЗ VI	0	+0,12	нет
V	ПКЗ V	0	+0,32	нет
	ПКЗ VII	0	+0,56	нет

Результаты исследования. Выполненное исследование выявило неточности на этапах 3D-печати и сборки. Значения отклонений показывают, что применение напечатанных деталей без выполнения доводочных операций и механообработки сопрягающихся поверхностей возможно, но для этого требуется учитывать особенности технологии 3D-печати, структурирование поверхности, усадку и т.д. В связи с этим наиболее рациональным способом будет являться традиционный подход, в рамках которого происходит увеличение или уменьшение размеров с целью последующей механообработки. Текстурирование поверхности, связанное с послойным синтезом объекта, приводит к тому, что на этапе цифровой метрологии строится поверхность аппроксимации с учётом текстуры поверхности и дефектов печати, так как точность сканирования составляет порядка 50 мкм, что в дальнейшем снижает точность попадания размеров в установленное поле допуска.

Список литературы

1. Петров М.А., Эльдиб И.С.А., Азатьян Э.М., Оптическое 3D-сканирование и оценка точности изготовления деталей и прототипов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2019. №12. С. 151 – 158.
2. Петров М.А. Применение технологий 3D-сканирования в заготовительной и машиностроительной практике // РИТМ машиностроения, №4. 2020. С. 32 – 41.
3. Информационный ресурс neopoint.rangevision [Электронный ресурс] URL: https://neopoint.rangevision.com (дата обращения: 27.09.2024).

Петров Михаил Александрович, канд. техн. наук, доцент, petrovma_mospolytech@mail.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Чан Динь Хынг, аспирант, tranhung.bk56@gmail.com, Россия, Москва, Московский политехнический университет

FORMULATION OF MANUFACTURING ACCURACY OF A STAMPING TOOL FOR MICRODRAWING MADE BY 3D-PRINTING TECHNOLOGY

M.A. Petrov, D.H. Tran

The paper evaluates the manufacturing accuracy of a deforming tool for microdrawing. Information on the accuracy of 3D-printed parts and final assemblies is obtained. With the help of digital metrology tools, the map of geometrical dimensions deviations is constructed based on the results of comparison of initial and actual 3D-models. The values of deviations of geometric dimensions and shape of parts differ depends on 3D-printing technologies.

Key words: microforming, scale factor, digital metrology, dimension deviation, 3D-scanning, RV 3D Studio, GOM Inspect.

Petrov Mikhail Alexandrovitch, candidate of technical sciences, docent, petrovma_mospolytech@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Tran Dinh Hung, postgraduate, tranhung.bk56@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

УДК 621.7.043
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-629-630

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗНОСА ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА

Е.М. Чунаева

В представленной статье описывается исследование в области обработки металлов давлением, конкретно – исследование процесса штамповки. Работа фокусируется на применении современных методов компьютерного моделирования для прогнозирования износа штамповой оснастки, что является важной составляющей оптимизации производственных процессов. Основное внимание уделяется использованию программного обеспечения QForm, которое является одним из ведущих инструментов в данной области в России. В статье детально анализируются два основных параметра оценки износа, встроенных в программу. Представлены результаты моделирования обратного выдавливания с демонстрацией распределения износа по инструменту, также приводятся данные об износе при изменении начальных условий, таких как коэффициент трения. В заключении подчеркивается, что применение технологий компьютерного моделирования является важной составляющей современного производства и позволяет продлевать срок службы инструмента, оптимизировать производство и повышать качество продукции.

Ключевые слова: штамповка, компьютерное моделирование, износ инструмента, обратное выдавливание, программное обеспечение, обработка металлов давлением.

Штамповка - один из самых распространенных методов обработки металлов давлением. В процессе штамповки инструмент подвергается значительным нагрузкам, что приводит к его износу и, как следствие, к снижению качества продукции и увеличению затрат на производство [1-4]. Для оптимизации процесса штамповки и продления срока службы инструмента широко применяется компьютерное моделирование [5-6].

Оно позволяет исследовать деформации и напряжения в инструменте и заготовке, а также оценивать контактное взаимодействие между ними [7-8]. На основе полученных данных можно прогнозировать распределение износа по контактной поверхности. Современные программные комплексы позволяют учитывать множество факторов, влияющих на износ инструмента, что обеспечивает высокую точность прогнозирования. Также моделирование позволяет выявлять критические зоны инструмента, подверженные наибольшему износу, и оптимизировать его конструкцию для повышения срока службы.

Таким образом применение компьютерного моделирования для прогнозирования износа штамповой оснастки является необходимой частью современного производства. Эта технология позволяет сократить расходы, время разработки и повысить качество продукции.

Поэтому было проведено компьютерное моделирование штамповки с применением одного из самых распространенных программных обеспечений в РФ для исследований процессов обработки металлов давлением, конкретнее QForm [9-10]. Анализируется износ инструмента при обратном выдавливании цилиндрической заготовки с дном, при этом в конструкции изделия предполагается также направляющий стержень, получаемый в этой операции. В QForm существуют встроенные стандартные подпрограммы для анализа износа деформирующего инструмента, их 2: wear_traction (рис. 1), wear_pressure (рис. 2).

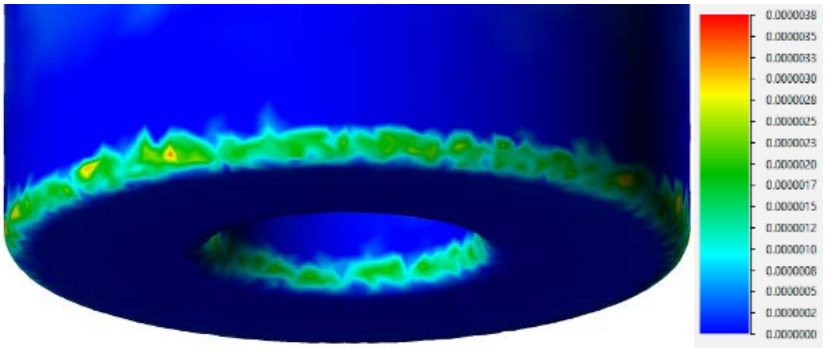


Рис. 1. Параметр wear_traction

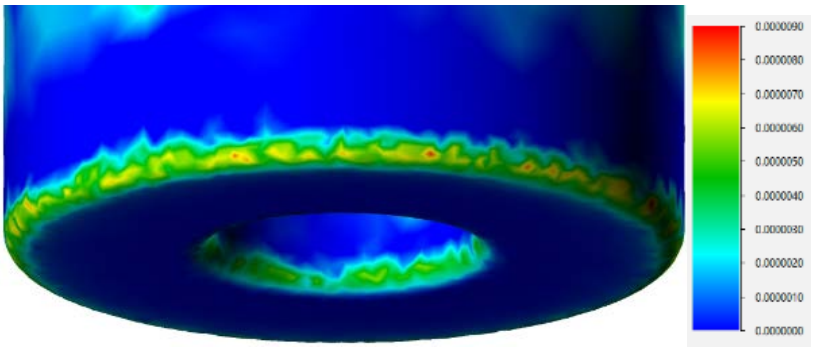


Рис. 2. Параметр wear_pressure

На рисунках, приведенных выше, представлены распределения износа на инструменте, имеющем осевое перемещение и осуществляющем пластическое формоизменение. Показатели износа наблюдаются только в области ребер. При этом остальные части инструмента, а именно матрица для выдавливания и верхняя часть пуансона практически не подвержены износу. Данные распределения характерны для ситуации, когда коэффициент трения по Кулону составляет 0,1. При увеличении коэффициента трения до 0,3 износ по параметру wear_traction увеличился на 36% и составил 0,000005168, при этом параметр wear_pressure увеличился на 29% и стал равным 0,00001161.

Хотя компьютерное моделирование обладает очевидными преимуществами, стоит отметить и существующие трудности. Во-первых, создание реалистичных моделей требует высокого уровня детализации и понимания физических процессов. Во-вторых, погрешности, возникающие на этапе ввода данных или выбора моделей поведения материалов, могут привести к ошибочным прогнозам. Наконец, в некоторых случаях трудности вызывает высокая стоимость программного обеспечения и необходимость обученного персонала.

В заключении можно сделать вывод, что компьютерное моделирование становится важным инструментом для прогнозирования износа штамповочного инструмента, позволяя минимизировать нагрузки, выбирать оптимальные материалы и конфигурации для работы. Применение современных технологий, дает возможность увеличивать срок службы оборудования, снижать затраты и повышать общую производственную эффективность.

Список литературы

1. Зубарев Ю.М. Динамические процессы в технологии машиностроения. Основы конструирования машин: Учебное пособие / Ю.М. Зубарев. СПб.: Лань, 2018. 212 с.

2. Бурцев В.М. Технология машиностроения. В 2-х т. Т. 1. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / В.М. Бурцев. М.: МГТУ им. Баумана, 2011. 478 с.

3. Яковлев С. С. Ковка и штамповка. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под общ. ред. С. С. Яковлева; ред. совет : Е. И. Семенов (пред.) и др. Москва : Машиностроение, 2010. 732 с.

4. Бочарова Ю.А. Машиностроение. В 40-а томах. Том IV Машины и оборудование кузнечно-штамповочного и литейного производства / Ю.А. Бочарова. М.: Машиностроение, 2005. 711 с.

5. Морозов Е. М. ANSYS в руках инженера. Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. М.: Ленанд, 2010. 456 с.

6. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении / Тихонов А.Н. и др. М.: Машиностроение, 1990. 264 с.

7. Жерносек В. Н. влияние формы и размеров заготовки при обратном выдавливании на износ инструмента и повреждаемость полуфабриката // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 8. С. 16-18.

8. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением : учебное пособие / А. А. Богатов, Д. А. Павлов, М. В. Ерпалов [и др.] ; под общей редакцией А. А. Богатова; Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. 248 с.

9. Подтягин В. Э. Опасность разрушения заготовки и износ инструмента при горячем обратном выдавливании // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 342-345.

10. QForm 2D/3D Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением. Версия V8. Начало работы. Часть 1. Начало работы. «КванторФорм», 2016. 112 с.

Чунаева Екатерина Михайловна, студент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Научный руководитель: Коротков Виктор Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE USE OF COMPUTER MODELING TO PREDICT THE WEAR OF A DIE TOOL

E.M. Chunaeva

This article describes research in the field of metalworking by pressure, specifically– the study of the stamping process. The work focuses on the application of modern computer modeling methods to predict the wear of die tooling, which is an important component of optimizing production processes. The main focus is on the use of QForm software, which is one of the leading tools in this field in Russia. The article analyzes in detail the two main parameters of the wear assessment built into the program. The results of modeling reverse extrusion with a demonstration of the wear distribution over the tool are presented, and data on wear under changing initial conditions, such as the coefficient of friction, are also provided. In conclusion, it is emphasized that the use of computer modeling technologies is an important component of modern production and allows you to extend the service life of the tool, optimize production and improve product quality.

Key words: stamping, computer modeling, tool wear, reverse extrusion, software, metal forming.

Chunaeva Ekaterina Mikhailovna, student, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Scientific advisor: Korotkov Victor Anatolievich, candidate of technical science, docent, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.77
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-631-632

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

И.В. Гребенщиков

В статье рассмотрены современные импульсные методы обработки металлов давлением, которые представляют собой перспективное направление в области машиностроения. Эти методы основаны на кратковременном воздействии высоких давлений на заготовку, внимание уделено таким технологиям, как электрогидравлическая штамповка, магнитно-импульсная обработка и штамповка взрывом. Показаны преимущества данных методов, включая возможность обработки труднодеформируемых материалов, получения деталей сложной формы и крупногабаритных изделий. Наибольшее внимание уделено магнитно-импульсной обработке, при которой используется энергия магнитного поля для деформации заготовок. Представлены новые подходы, предполагающие преобразование энергии магнитного поля в движение жесткого инструмента, что расширяет возможности применения данного метода, включая листоштамповочные операции. Описаны устройства, позволяющие реализовать новые подходы, их конструктивные особенности и ограничения в применении.

Ключевые слова: импульсная обработка, обработка металлов давлением, штамповка, магнитно-импульсная обработка металлов, устройство для штамповки, энергоэффективность.

Импульсные методы обработки металлов давлением представляют собой перспективное направление в современном машиностроении для получения металлических деталей [1-4]. Эти методы основаны на кратковременном воздействии высоких давлений на заготовку, что позволяет достичь деформации за один технологический цикл.

Основными преимуществами импульсных методов являются высокая производительность, возможность обработки труднодеформируемых материалов и получение деталей сложной формы [5-8]. При изготовлении цилиндрических деталей наиболее часто применяются такие методы, как электрогидравлическая штамповка, магнитно-импульсная обработка и штамповка взрывом.

Электрогидравлическая штамповка основана на использовании энергии электрического разряда в жидкости. При этом методе заготовка помещается в камеру, заполненную жидкостью, и подвергается воздействию ударной волны, возникающей при электрическом разряде. Этот метод позволяет получать цилиндрические детали с высоким качеством поверхности, так как нет соприкосновения и деформирования жестким инструментом.

Штамповка взрывом основана на использовании энергии взрыва для деформации металла. Этот метод позволяет получать крупногабаритные цилиндрические детали из труднодеформируемых материалов. Однако его применение ограничено из-за необходимости соблюдения строгих мер безопасности.

Наиболее распространенным импульсным методом является магнитно-импульсная штамповка (МИОМ), которая использует энергию импульсного магнитного поля для деформации заготовки. Этот метод особенно эффективен для обработки тонкостенных цилиндрических деталей из электропроводящих материалов. Преимуществами данного метода являются высокая скорость процесса и отсутствие механического контакта с заготовкой.

Однако МИОМ в основном используется для сборочно-разборочных операций, обжима и раздачи, так как заготовка для такого метода должна быть замкнутой, например, иметь форму цилиндра. В настоящее же время существуют разработки, которые позволяют энергию магнитного поля преобразовывать в возвратно-поступательное движение жесткого инструмента, например, пуансона. Что позволяет осуществлять вытяжку, пробивку, вырубку, гибку и другие листоштамповочные операции из плоской листовой штамповки из любых материалов, за исключением высокопрочных. В частности, яркими примерами нового подхода являются устройства для магнитно-импульсной штамповки [9-10], представленные на рисунках 1 и 2.

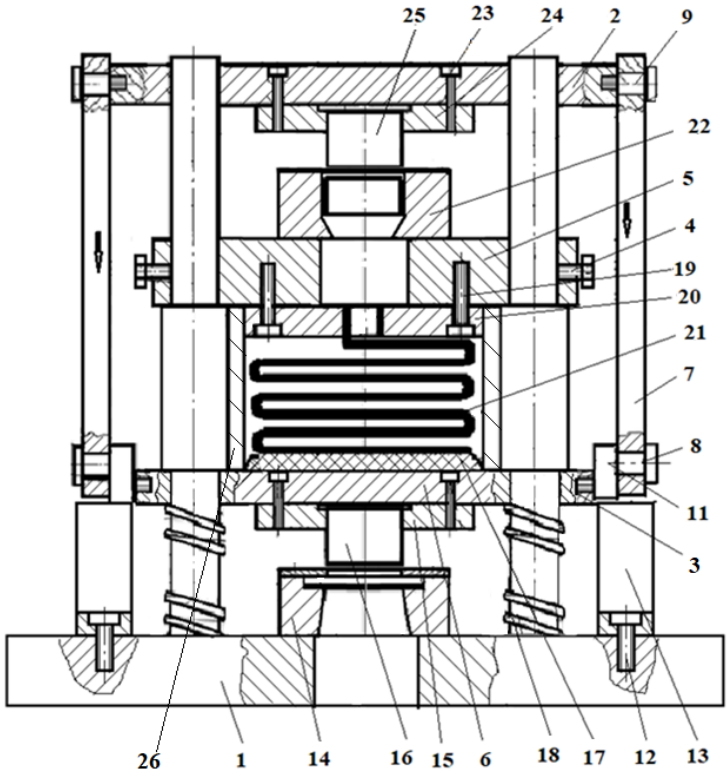


Рис. 1. Устройство для магнитно-импульсной штамповки [9]

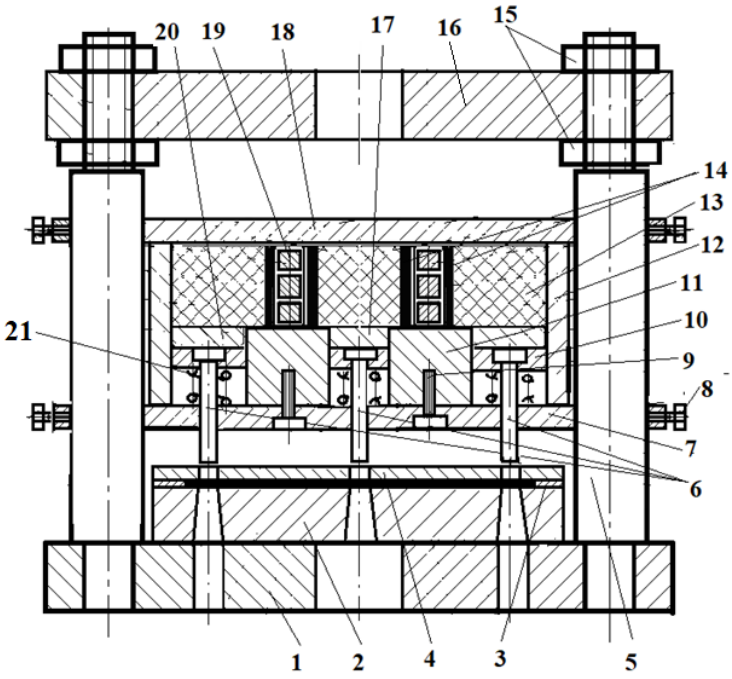


Рис. 2. Устройство для магнитно-импульсной штамповки [10]

Основной идеей представленных устройств является преобразование импульсного магнитного поля в движение жесткого штамповочного инструмента, по средствам сложной механической системы (рис. 1) или эластичной среды (рис. 2)

Таким образом достоинством нового подхода использования импульсного магнитного поля можно назвать отсутствие в необходимости применения громоздкого прессового оборудования, высокую производительность и более компактные размеры установки с устройством для штамповки. Однако существует ряд ограничений, в том числе по толщине штампуемого материала, а также по длине рабочего хода. Но при этом такие устройства можно применять в условиях ограниченного пространства и за счет возможности быстрой и простой замены жесткого инструмента имеют перспективы в использовании. В итоге при применении импульсных методов обработки для получения цилиндрических деталей необходимо учитывать ряд факторов, таких как свойства материала заготовки, требуемые размеры и форма детали, а также технологические возможности оборудования. Правильный выбор метода и параметров процесса позволяет достичь высокого качества изделий.

Список литературы

1. Яковлев С.П., Кухарь В.Д., Новиков С.С. Обжим кольца импульсным магнитным полем // Известия вузов. Машиностроение, № 4, 1985. С. 104-108.

2. Магнитно-импульсная обработка материалов / А. Б. Прокофьев [и др.]. Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. 140 с.

3. Талалаев А.К. Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов. М.: Информтехника, 1992. 143 с.

4. Бочарова Ю.А. Машиностроение. В 40-а томах. Том IV Машины и оборудование кузнечно-штамповочного и литейного производства / Ю.А. Бочарова. М.: Машиностроение, 2005. 711 с.

5. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. Харьков; Вища школа, 1977. 168 с.

6. Технология магнитно-импульсной обработки материалов / В. А. Глущенков [и др.]. Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. 208 с.

7. Иванов Е.Г. Раздача конической заготовки импульсным магнитным полем // Импульсное нагружение конструкций / Чебоксары, 1972. Вып. 3. С. 13-18.

8. Орлов А.А., Киреева А.Е. Применение теории пластического течения для моделирования поведения заготовки для МИОМ / Известия ТулГУ «Актуальные задачи механики». 2005. Вып. 2. С. 224-228.

9. Патент № 215915 Российская Федерация, B21D 26/14 (2006.01). Устройство для магнитно-импульсной штамповки : № 2022122710: заявл. 22.08.2022 : опубл. 09.01.2023, Бюл. № 1 / Коротков В.А., Яковлев С.С., Гасанов А.И., Каркач К.А.

10. Патент № 2692005 Российская Федерация, МПК B21D 26/14 (2006.01). Устройство для магнитно-импульсной штамповки : № 2018142976 : заявл. 05.12.2018 : опубл. 19.06.2019, бюл. № 17 / Коротков В.А., Кухарь В.Д., Киреева А.Е., Ларин С.Н., Яковлев С.С.

Гребенщиков Иван Владимирович, магистрант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF PROMISING AREAS OF USE OF PULSE PROCESSING METHODS

I.V. Grebenschickov

The article considers modern pulse methods of metal forming, which represent a promising direction in the field of mechanical engineering. These methods are based on the short-term effect of high pressures on the workpiece, attention is paid to such technologies as electrohydraulic stamping, magnetic pulse processing and explosive stamping. The advantages of these methods are shown, including the possibility of processing difficult-to-deform materials, obtaining parts of complex shapes and large-sized products. The greatest attention is paid to magnetic pulse processing, which uses the energy of a magnetic field to deform workpieces. New approaches are presented that involve converting the energy of a magnetic field into the movement of a rigid tool, which expands the possibilities of using this method, including sheet metal stamping operations. Devices that allow the implementation of new approaches, their design features and limitations in application are described.

Key words: pulse processing, metal forming, stamping, magnetic pulse processing of metals, stamping device, energy efficiency.

Grebenschickov Ivan Vladimirovich, student, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7.04
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-634-635

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛУФАБРИКАТА ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ГОФРИРОВАНИИ ОБЖИМОМ

С.С. Яковлев, А.А. Шишкина

В статье рассматривается температурное поведение материала заготовки в процессе холодной листовой штамповки. Особое внимание уделено исследованию взаимодействия процессов пластической деформации и сил трения, приводящих к изменению температуры материала. Для анализа использовался метод численного моделирования в программном обеспечении QForm, позволяющий динамически учитывать изменения механических характеристик материала в зависимости от его температуры. Проведены исследования температуры заготовки при продольном гофрировании трубчатой заготовки. В роботе приведены распределения температур материала, а также максимальные температуры. В результате анализа сделан вывод о том, что температура штамповки, несмотря на локальные повышения, остается близкой к исходным условиям, не влияя существенно на пластические и механические свойства конечного изделия.

Ключевые слова: холодная штамповка, гофрирование, пластическая деформация, температурное распределение, метод конечных элементов, программное обеспечение.

В машиностроении при обработке металлов практически любым способом, будь то сверление, шлифование, фрезерование, пластическое формоизменение, физико-химическая обработка в большинстве случаев связано с изменением температуры заготовки [1-4]. Даже при обработке при комнатной температуре, без предварительного нагрева заготовки ли инструмента происходит повышение температуры обрабатываемого материалы в результате действия сил трения, пластического формоизменения или иных факторов [5-7]. В процессе штамповки происходит интенсивное пластическое деформирование заготовки, что сопровождается выделением тепла, к этому приводит также работа сил трения. Исследование температурных параметров деталей в процессе штамповки важно для оценки изменения механических характеристик материала, качества конечного изделия, износа инструмента, а также предотвращения дефектов, вызванных термическими нагрузками.

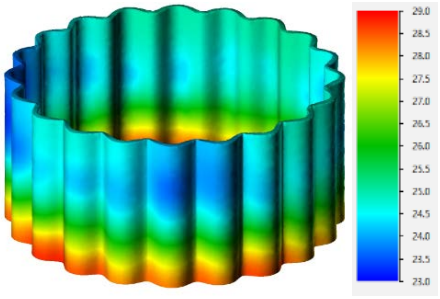


Рис. 1. Распределение температур по полуфабрикату

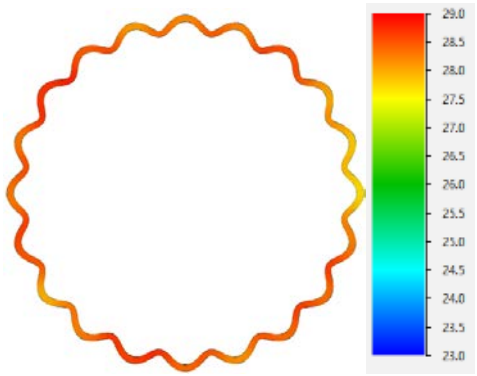


Рис. 2. Распределение температур в сечении

Экспериментальное исследование этих процессов зачастую требует значительных затрат и времени, поэтому моделирование процесса становится одним из инструментов, которые можно использовать для решения этой задачи. Чаще всего в этой области используют численные методы, такие как метод конечных элементов, который позволяет воспроизвести процессы пластической деформации и теплообмена. Одним из примеров программного обеспечения, который реализует возможность исследования тепловых процессов, в том числе непосредственно при пластическом формоизменении, является QForm. В котором возможно также изменение механических характеристик динамически, в зависимости от температуры материала заготовки [8-10].

Во всех процессах обработки металлов давлением оценка температуры материала является важной задачей, в том числе и при холодной листовой штамповке. В данной работе рассматривается процесс гофрирования и то, как влияет пластическая деформация в совокупности с силами трения на температуру материала. Для этого было проведено моделирование в программе, описанной ранее, так материалом заготовки послужила сталь 10, коэффициент трения равен 0,1 по Кулону, амплитуда гофр составляет 2, 3, 4 мм при толщине стенки 1, 1,5 и 2 мм.

Для примера на рисунке 1 приведено распределение температур по материалу полуфабриката при гофрировании заготовки толщиной 2 мм с амплитудой 4 мм, на рисунке 2 приведено изображение температуры в сечении близкому к нижней части изделия.

Максимальные температуры заготовки после штамповки

	Толщина стенки, мм			
		1	1,5	2
Амплитуда гофр, мм	2	21,8	24,4	26,0
	3	22,0	24,6	26,2
	4	22,0	26,8	29,0

Увеличение амплитуды гофр при фиксированной толщине стенки также приводит к увеличению температуры заготовки. Для больших значений толщины стенки (например, 2 мм) разница температур между амплитудами 2 мм и 4 мм является более значительной, чем для меньших толщин. При малых толщинах стенки (1 мм) амплитуда гофра практически не влияет на температуру. Максимальная температура наблюдается при максимальных значениях обоих параметров (амплитуда 4 мм и толщина 2 мм) – 29,0 °С. В данном случае стоит отметить, что температура материала практически не меняется относительно начальных условий, и не сможет повлиять на пластические и механические характеристики изделия.

Список литературы

1. Яковлев С. С. Ковка и штамповка. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под общ. ред. С. С. Яковлева; ред. совет : Е. И. Семенов (пред.) и др. Москва : Машиностроение, 2010. 732 с.

2. Голенков В.А., Дмитриев А.М., Кухарь В.Д., Радченко С.Ю., Яковлев С.П., Яковлев С.С. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением. М.: Машиностроение, 2004. 464 с.

3. Бочарова Ю.А. Машиностроение. В 40-а томах. Том IV Машины и оборудование кузнечно-штамповочного и литейного производства / Ю.А. Бочарова. М.: Машиностроение, 2005. 711 с.

4. Шишкина А.А. Обзор программного обеспечения для компьютерного моделирования процессов гофрирования трубчатой заготовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 8. С. 221-223.

5. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

6. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1986. Т.2. Горячая штамповка / Под ред. Е.И. Семенова, 1986. 592 с.

7. Иванов К.М., Звонцов И.Ф., Серебреницкий П.П. Разработка технологических процессов изготовления деталей общего и специального машиностроения. М.: Лань, 2018. 696 с.

8. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением: учебное пособие / А. А. Богатов, Д. А. Павлов, М. В. Ерпалов [и др.] ; под общей редакцией А. А. Богатова; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2018. 248 с. EDN UUHNSC.

9. QForm. Моделирование процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс] URL: https://qform3d.ru (дата обращения: 21.05.2024).

10. QForm 2D/3D Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением. Версия V8. Начало работы. Часть 1. Начало работы. «КванторФорм», 2016. 112 с.

Яковлев Сергей Сергеевич, ассистент, yakovlev-ss-science@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Шишкина Анастасия Андреевна, аспирант, shishkina5ap@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STUDY OF SEMI-FINISHED PRODUCT TEMPERATURE DURING LONGITUDINAL CORRUGATING BY CRIMPING

S.S. Yakovlev, A.A. Shishkina

The article considers the temperature behavior of the workpiece material during cold sheet metal stamping. Particular attention is paid to the study of the interaction of plastic deformation processes and friction forces leading to a change in the material temperature. For the analysis, the numerical modeling method in the QForm software was used, which allows dynamically taking into account changes in the mechanical characteristics of the material depending on its temperature. The workpiece temperature was studied during longitudinal corrugation of a tubular workpiece. The work provides the distribution of material temperatures, as well as maximum temperatures. As a result of the analysis, it was concluded that the stamping temperature, despite local increases, remains close to the original conditions, without significantly affecting the plastic and mechanical properties of the final product.

Key words: cold stamping, corrugation, plastic deformation, temperature distribution, finite element method, software.

Yakovlev Sergey Sergeevich, assistant, yakovlev-ss-science@yandex.ru, Tula, Russia, Tula State University,

Shishkina Anastasia Andreevna, postgraduate, shishkina5ap@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.86.065:69(075.8)
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-636-637

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГРУЗОНЕСУЩИХ ТРАВЕРС ДЛЯ ПОРТОВЫХ ГРУЗОВ

Н.В. Дульгер, А.В. Кораблин

Современные технические средства перегрузочной техники для перевалки и перегрузки портовых грузов создают резерв пропускной способности порта, способствуют росту грузооборота и ускорению обработки судов. В статье приведены результаты по проектированию съемных грузозахватных приспособлении кранов. Для морского терминала ООО «Альфа-Порт» (г. Астрахань) разработаны конструкции плоско-пространственных траверс для подъема и перемещения насыпных грузов в мягких специализированных контейнерах массой 1-1,5 тонн каждый с применением численных методов расчетного анализа и метода конечных элементов.

Ключевые слова: съемное грузозахватное приспособление; траверса; проектирование; расчетный анализ, метод конечных элементов.

В обеспечении интермодальных перевозок обозначено важное значение геополитического положения России, диктующей необходимость приоритетного развития транспортно-технологических перегрузочных комплексов, где, титульное значение приобретает краностроение, призванное обеспечить перегрузку насыпных грузов по российским коридорам вдвое быстрее. Перегрузочные работы в речных и морских портах, на железной дороге, в складских комплексах относятся к наиболее трудоемким работам на транспорте. В связи с этим, успешное выполнение погрузочно-разгрузочных работ и обращение с грузами возможно на основе эффективного выбора выше представленных средств механизации, эффективного соблюдения нормативных документов [1,2] и четко разработанной технологии – последовательности выполнения основных и вспомогательных операций по перегрузке грузов.

Среди систематизированных изданий, посвящённых теории и практике проектирование СГП кранов следует отметить работу авторов [3] обобщивших материалы по проектированию и эксплуатации СГП канатных, цепных и текстильных стропов, траверс, тары и их элементов с учетом требований последних нормативно-технических и методических разработок, ГОСТов, РД и других документов [4].

Через Астраханскую область проходит международный транспортный коридор «Север-Юг», который соединяет Россию с Индией, Ираном, Афганистаном и странами Центральной Азии. Транспортировка грузов на различных судах основной фактор развития международной торговли в азиатском направлении.

Из портов Бендер-Энзели, Амирабад, Ноушехр и Туркменбаши порт в Астраханскую область поставляется большое количество насыпных грузов в мягких специализированных контейнерах (МСК) (биг-бэгах), таких как гильсонит, хлористый калий, полипропилен, полиэстер, вторичное полиэфирное волокно, песчано-гравийная смесь, гипс. Использование наклонных стропов (и дополнительных надстропников) при подъеме и перемещении насыпных грузов в МСК приводит к их взаимному давлению и межконтактному трению при работе крана, и, как следствие, ускоренному износу материала МСК. Это в свою очередь приводит к перетарке груза и требует дополнительных затрат времени.

Главной проблемой всех Астраханских портов стала не готовность к нарастающему грузообороту МСК, что приводит к задержкам и очередям на причалах.

С целью увеличения пропускной способности морского порта ООО «Альфа-Порт» (г. Астрахань) сегодня разрабатывается огромное количество инвестиционных проектов, предусматривающих наращивание его производственных мощностей. Основная задача порта состоит в разработке оптимального обслуживании судов с целью увеличение производственной мощности.

Анализ существующего перегрузочного процесса, технологические карты порта, производственные мощности, грузовые потоки и техническая оснащённость показал, что применение траверс, обеспечивающих безопасное перемещение МСК и предохраняющих поднимаемые грузы от сжатия позволит увеличить количество перегруженных биг-бэгов с 2 до 4/6/8 за один раз и даст возможность передовой линии работать на своих максимальных пропускных мощностях и существенно сократит время разгрузки судна.

При выполнении погрузочно-разгрузочных работ в ООО «Альфа-Порт» (г. Астрахань) применяются разработанные конструкции траверс, представленные на рис. 1-4. В издании [3] предложены расчеты СГП с примерами, имеется достаточный справочный и библиографический материал, однако авторы не уделили внимание возможностям применение ЭВМ и численных методов анализа, что достаточно характерно для плоско-пространственных несущих конструкций СГП кранов.

Траверса линейная крановая грузоподъемностью (г/п) 12 тонн ТЛК-12/3,35 пролётом 3,5 метров (рис.1) используется для грузовых операций в порту портальными кранами КПП 16/32 и автомобильными кранами грузоподъемностью до 25 тонн. Сварная металлоконструкция пролётной рамы траверсы ТЛК-12/3,35 выполнена из балочных

элементов электросваркой полуавтоматической ГОСТ 14771-74 в среде углекислого газа, с использованием проволоки СВ08Г2С ∅1,2 мм ГОСТ 2246-70. Несущая рама металлоконструкции выполнена листовой горячекатанной стали Ст3сп ГОСТ 14637-89 толщиной 8, 16 и 25 мм и труб Ø152×8 мм и по периметру имеет коробчатое сечение 180×180×8 мм. Вертикальные стенки балки приняты из листа 8 мм, горизонтальные полки 8 мм. [5]

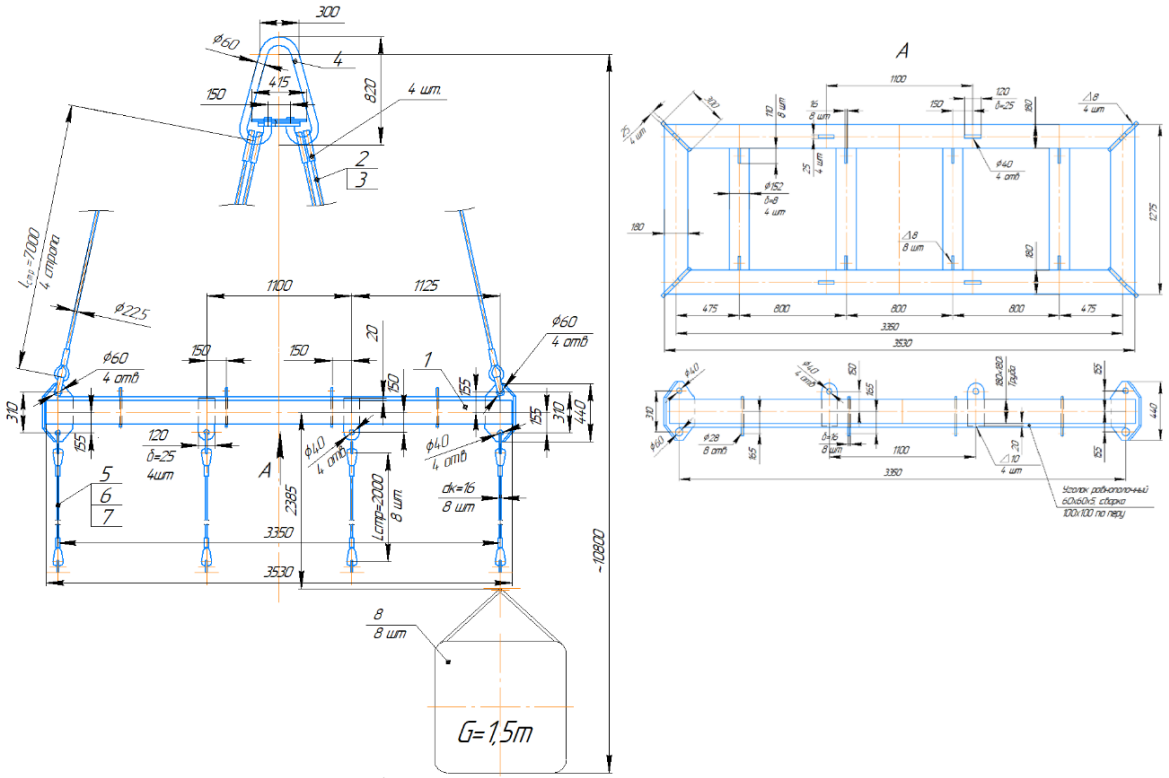


Рис. 1. Плоско-пространственная траверса ТЛК-12/3,35м (исполнение 1): 1-несущая металлоконструкция; 2,3 - подвесные канатные стропа; 4 – грузовая «лира»; 5,6,7 – грузовые канатные стропа; 8 - груз

Продольные балки плоской рамы в промежутке, между концевыми перемычками, связаны сваркой промежуточными четырьмя перемычками из трубы Ø152×8 мм. По углам между балочными элементами плоской рамы вварены грузовые спаренные (вниз и вверх) проушины: вверх под навесные стропы, вниз – на грузовые. Кроме крайних грузовых, в балочные элементы рамы врезаны (насквозь) и вварены две дополнительные грузовые проушины, а при подвеске плоской рамы траверсы обратной стороной используются грузовые проушины, вваренные в поперечные трубные перемычки. Верхние подвесные стропы 4-х ветвевого подвеса 4СК-16,0 охвачены звеном РТ-1 (лирой) Ø60 мм (см. рис.1), а нижние подвесные стропа УСК1-3,2 (8 шт.) оборудованы чалочными крюками, идущими на подстропники (2 шт. либо 4 шт.) МСК. Подвесные стропы 4СК-16 «идут» на «лиру» через коуши, а на грузовые стропы, идущие на замкнутые проушины траверсы, навешены разъемные такелажные скобы Ø20 мм по ГОСТ 25573-82 (либо по ОСТ 5.2312-79) [5].

Балочный размер подвеса отдельного груза составляет 800/1100 мм, а габариты подвеса плоско-пространственной рамы траверсы составляет 3,35м, для увеличения момента сопротивления пролетных балок траверсы, снизу, по правому и левому перу, наварен равнополочный уголок 60×60×5. Кроме того, как это следует из рис. 1, базовый размер подвеса груза на грузовые стропы может меняться после кантования траверсы на 180^0 (рис.2).

Спроектированная траверса линейная крановая г/п 12тонн - ТЛК-12/1/4 пролётом 1,0 м. оборудована навесной грузовой платформой (рис.3) для случая, пакетированного на поддонах (паллетах) полезного груза, в том числе в мешках либо в биг-бэгах. Несущая металлоконструкция траверсы на подвесном стропном подвесе изготовлена по техническим условиям аналогичным траверсе ТЛК-12/3,35м и способна перераспределять полезную нагрузку на грузовую платформу грузовым 4-х ветвевым текстильным стропом, после чего транспортируемый груз перемещается вилочным погрузчиком.

Балки несущей металлоконструкции имеют квадратное коробчатое сечение 140×140×6мм по периметру в 1000 мм, стенки которых приняты из листа толщиной 6мм. Между балочными элементами плоской рамы вварены грузовые спаренные (вверх и вниз) проушины листа толщиной 16 мм (вверх под подвесные стропы, вниз – на грузовые).

Верхние подвесные стропы 4-х ветвевого подвеса 4СК-16,0 охвачены звеном ОВ2 Ø34 мм, а нижние грузовые текстильные стропа типа СТП (4 шт.) либо стальные канатные оборудованы чалочными крюками, идущими на петли грузовой платформы. Подвесные стропы 4СК-16 «идут» на звено ОВ2 через коуши и такелажные скобы Ø20мм, а на грузовые текстильные стропа, навешены разъемные такелажные скобы Ø25 мм.

На рисунке 4 представлена траверса ТЛК-8/3. Несущая рама металлоконструкции (м/к) траверсы имеет две коробчатые продольные балки длиной 4000 мм сваренные по ГОСТ 8240 из двух швеллеров №16 (высотой 160мм) по перу, толщиной стенок S=5мм, полок t=8,4мм, шириной полок b=64 мм, моментом сопротивления одного швеллера W_x=93,4 $см^3$ и моментом инерции I_x=747 $см^4$ (W_x=13,8 $см^3$, I_x=63,3 $см^4$). Продольные балки м/к траверсы ТЛК 8/3 сварены тремя поперечными перемычками с шагом 1000мм из швеллера №16 по размеру между внутрен-

ними стенками балок 594 мм. По крайним перемычкам продольных балок, наружные стенки швеллеров усилены сваркой «J»-образной подложкой из стали Ст3сп (по ГОСТ 14637) толщиной 10 мм (4 шт.). На них по периметру приварены грузовые проушины из Ст3сп толщиной 24 мм и с отверстиями ∅70 мм под подвесные стропы $L_{СТР}$=7 м. По линии створа балочных швеллеров №16, сваренных прерывистыми швами ◺8 мм с шагом 100×100 мм насквозь вварены 8 гнутых проушин из прутка ∅30 мм с габаритом по наружным кромкам 120 мм.

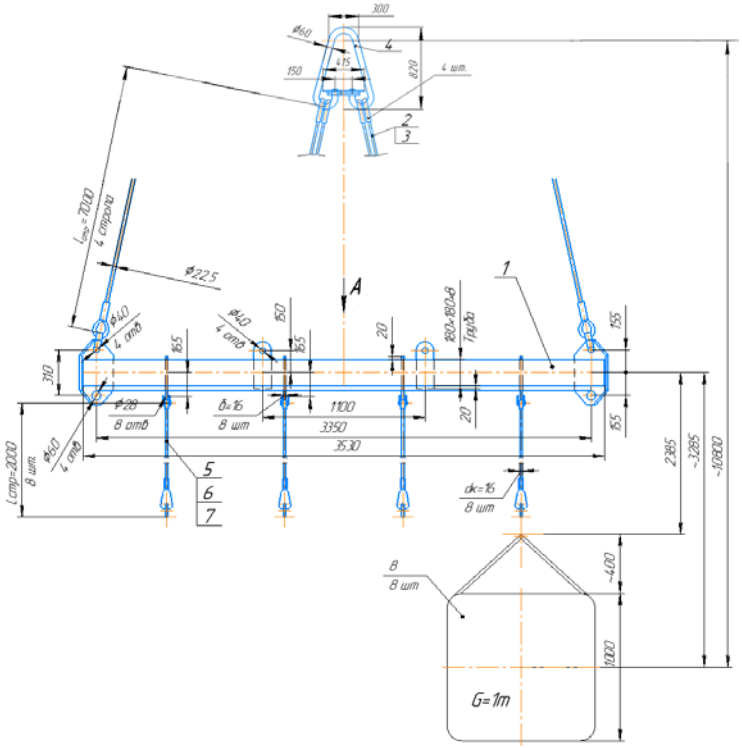


Рис. 2. Траверса ТЛК-12/3,35м (исполнение 2) подвес полезного груза после кантования траверсы на 180^0 (см. рис.1): 1-несущая металлоконструкция; 2,3 - подвесные канатные стропа; 4 – грузовая «лира»; 5,6,7 – грузовые канатные стропа; 8 - груз

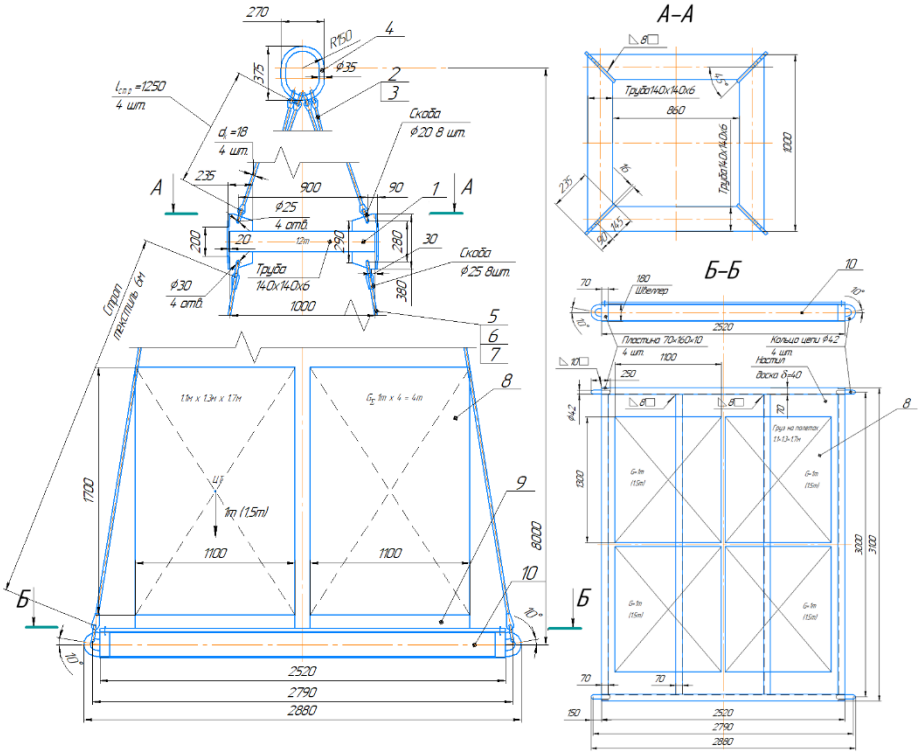


Рис. 3. Траверса ТЛК-12/1/4 оборудованная грузовой платформой: 1-несущая металлоконструкция; 2,3,4 – 4х ветвевая подвесная стропная система; 5,6,7 – тоже грузовая; 8,9 – пакетированный полезный груз на поддонах; 10 – грузовая платформа

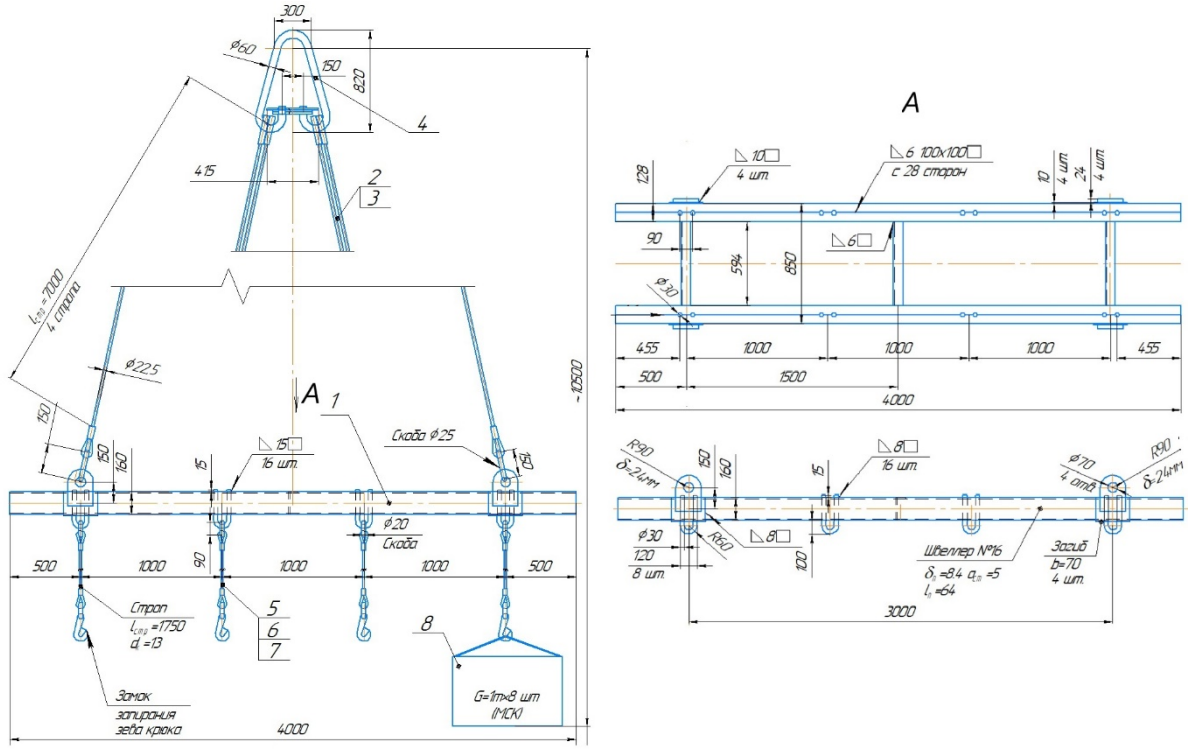


Рис.4. Траверса ТЛК-8/3: 1-несущая металлоконструкция; 2,3 - подвесные канатные стропа; 4 – грузовая «лира»; 5,6,7 – грузовые канатные стропа; 8 - груз

На проушины (8 шт.) навешены грузовые стропы с шагом 1000мм, снабженные чалочными крюками с замками запирания зева, на которых навешиваются для перегрузки (ПРТС работ) МСК. Балочный размер между подвесами отдельного груза составляет 1000×3 мм.

Изготовленные траверсы на предприятиях, имеющих лицензию органов Ростехнадзора [6], подвергаются осмотру и испытаниям нагрузкой в 1,25 раза превышающей их номинальную грузоподъемность.

Расчет на прочность металлических конструкций кранов и их элементов производится методом конечных элементов в детерминированной форме, устанавливают при этом две группы предельных состояний, одна из которых по исчерпанию несущей способности [8], другая по достижению конструкцией условий, нарушающих нормальную эксплуатацию траверсы.

Для установления параметров напряженно-деформированного состояния металлоконструкций разрабатываемых траверс представлялся в виде пластинчато-стержневых конечно-элементных моделей, как систем со многими «*n*» степенями свободы [9]. Расчёт проводился с использованием универсальной системы для расчета и проектирования APM Structure 3D. Конечные элементы траверс представлены пластинами, связанными между собой в узлах к которым приложена полезная нагрузка. Пластины имеют аналогичные элементам параметры жесткости. Груз представлен как распределенная по площади нагрузка, сосредоточенная в узлах модели [10].

При расчете металлических конструкций (м/к) траверс по первому предельному состоянию необходимо соблюдение условия:

$$\sigma_{\max}^{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \le R_y \cdot \gamma_c, \quad (1)$$

где $\sigma_{\max}^{\text{экв}}$ – наибольшее расчетное эквивалентное напряжение в опасной точке от максимальных нагрузок при 2х-осном напряженном состоянии; R_y – расчетное сопротивление материала; γ_c – коэффициент условий работы [9]; σ_x и σ_y – нормальные напряжения по двум взаимно перпендикулярным направлениям, соответствующие расчетным случаям, при которых возникают наибольшие напряжения; τ_{xy} – касательное напряжение в той же точке.

В случае одноосного напряженного состояния из (1) получаем:

$$\sigma_{\max}^{\text{экв}} \le [\sigma_{\max}], \quad (2)$$

в котором расчетное сопротивление материала согласно [9]:

$$R_y = \frac{R_{\text{уп}}}{\gamma_m}, \quad (3)$$

где $R_{\text{уп}}$ - нормативное сопротивление материала, МПа; γ_m - коэффициент надежности по материалу (для стали Ст3сп).

Коэффициент условий работы γ_c в (1) определяется по формуле:

$$\gamma_c = \gamma_c' \cdot \gamma_c'' \cdot \gamma_c''', \quad (4)$$

где γ_c' - коэффициент условий работы узлов, учитывающий несовершенство используемых методов расчета; γ_c'' - коэффициент, учитывающий возможные отклонения толщин профилей металла, коррозионный износ и т.п.; γ_c''' - коэффициент, учитывающий возможные последствия от разрушения рассчитываемого элемента.

На основании практического опыта проведения расчетного анализа сложных пространственных инженерных сооружений предложено в качестве базовых конечных элементов использовать широко распространённую модель одномерного стержня и двумерной плоско-пространственной четырехузловой пластины, имеющей пять сте-

пеней свободы в каждом узле (u, v, w, θ_{xi} и θ_{yi}), первые две степени свободы из которых формируют модель двухосного плоского напряженно-деформированного состояния [10], а остальные – модель пластинчатого элемента Кирхгофа [11], деформации которого определяются перемещениями w_i *(i= 1,2,3,4)* из плоскости пластины и углов поворота его узлов (см.рис.5).

Из этого следует что полную матрицу жесткости пластинчатого КЭ порядка 20×20 получают путем сложения матриц жесткости плоского пластинчатого элемента и пластинчатого элемента Кирхгофа при пространственном деформировании, стороны которого остаются прямыми, когда элемент деформируется в плоскости, а для перемещений из плоскости используется теория тонких пластин Кирхгофа, которая пренебрегает поперечными деформациями сдвига, что может являться важным, если пластина имеет толщину большую, чем 1/10 её ширины (т.е. для толстых пластин) [10].

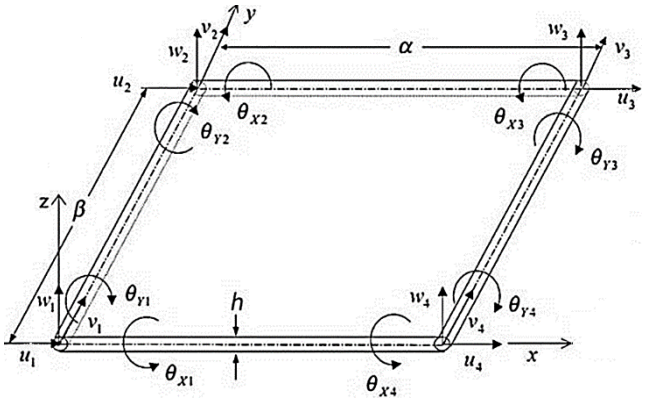


Рис. 5. Четырехузловой пластинчатый конечный элемент с пятью узловыми степенями свободы: u_i, v_i – перемещения в плоскости; w_i – из плоскости, θ_{xi} и θ_{yi} – углы поворота узлов

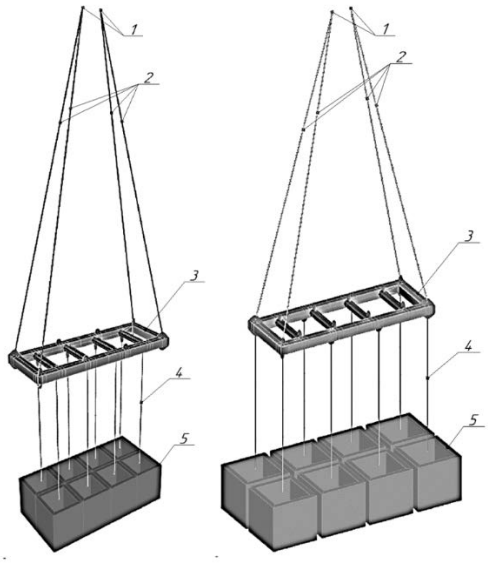
Известная матрица жесткости стержневых конечных элементов [11] принята за основу при формировании матричного уравнения статического равновесия:

$$[K]_{n\times n} \times \{v\}_{1\times n} = \{\mathrm{P_{ст}}\}, \quad (5)$$

где *n*-го порядка, в частности, для траверсы ТЛК-12/3,35, конечно-элементная модель которой представлена на рис.6 и 7, *n*=5058; для траверсы ТЛК-12/1 (см.рис.8) *n*=3522; для траверсы ТЛК-8/3 (см.рис.9) *n*=2172.

Расчетная конечно-элементная модель траверсы ТЛК-12/3,35 при эксплуатационном состояние I (с рабочей нагрузкой 8 тонн) и состоянии II (с рабочей нагрузкой 12 тонн) представлена на рис.6. При этом в состояние I: испытательный груз - биг-бэги 12 шт. (12×1,25т = 15 тонн); конечный элемент типа стальной канат – 60; узлов 843 (количество степеней свободы n=5058). В эксплуатационном состоянии II: испытательный груз - биг-бэги (8×1,5т=12 тонн); конечный элемент типа стальной канат – 60; узлов 843 (количество степеней свободы n=5058).

Распределение эквивалентных напряжений в расчетной конечно-элементной модели траверсы ТЛК-12/3,35 в двух эксплуатационных состояниях показано на рис.7. Состояние I с рабочей эксплуатационной нагрузкой 8 тонн при испытательном грузе 15 т максимальные напряжения в верхних проушинах грузовых стропов составили $\sigma_{экв}$=82,9 МПа, в состоянии II с рабочей эксплуатационной нагрузкой 12 тонн при испытательном грузе 15 т - максимальные напряжения в верхнем поясном листе составили $\sigma_{экв}$=45,2 МПа).



а ***б***

Рис. 6. Расчетная конечно-элементная модель траверсы ТЛК-12/3,35: а – эксплуатационное состояние I; б – эксплуатационное состояние II: 1 – крюковая подвеска крана; 2 – 4х-ветвевой строп; 3 – металлоконструкция траверсы; 4 – одноветвевой строп; 5 – груз (биг-бэги)

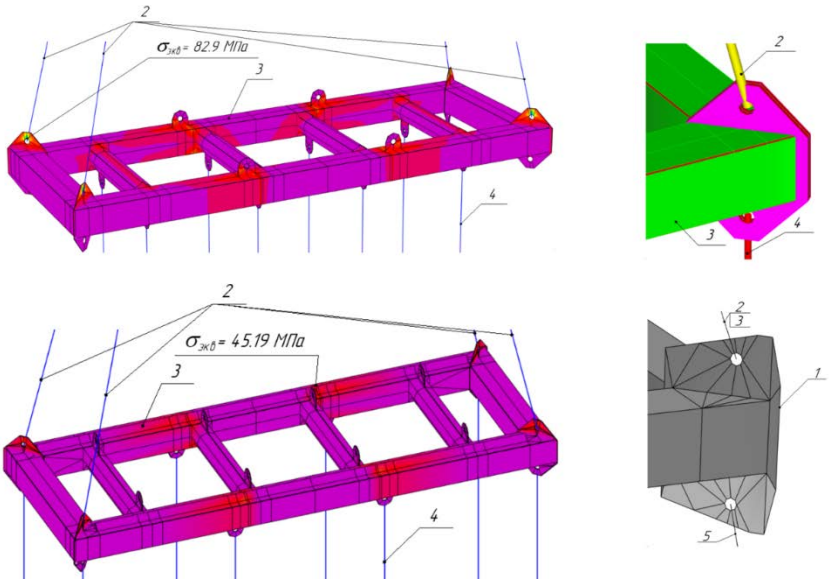


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений в расчетной конечно-элементной модели траверсы ТЛК-12/3,35: а – эксплуатационное состояние I; б – эксплуатационное состояние II: 1 – металлоконструкция траверсы;2 – четырехветвевой строп; 3 – металлоконструкция траверсы; 4 – одноветвевой строп

Расчетная конечно-элементная модель траверсы ТЛК-12/1/4 с рабочей нагрузкой 4 тонны, испытательным грузом (биг-бэги): 4×1,5 тонна=6 тонн (испытательный груз: 12т×1,25=15 тонн); конечный элемент типа стальной канат – 12; узлов 587 (количество степеней свободы n=3522) и распределение эквивалентных напряжений в расчетной конечно-элементной модели траверсы ТЛК-12/1/4 грузоподъемностью 12 тонн при испытательном грузе 15 тонн, максимальные напряжения $\sigma_{экв}$=111.8 МПа показано на рис.8.

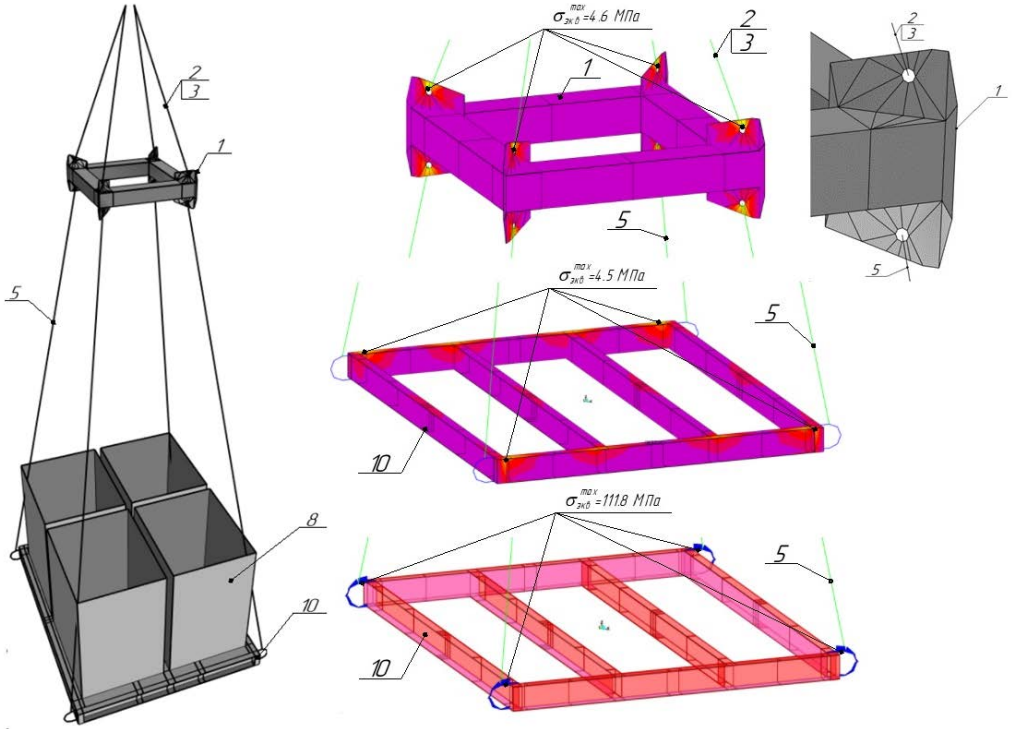


Рис. 8. Расчетная конечно-элементная модель траверсы ТЛК-12/1/4: 1 – металлоконструкция траверсы; 2,3 –четырехветвевой строп; 5 – одноветвевой строп; 8 – груз - биг-бэги

Расчетная конечно-элементная модель траверсы ТЛК-8/3 эксплуатационное состояние которой с рабочей нагрузкой 8 тонн: груз (биг-бэги) 8×1т=8 тонн (испытательный груз – 8×1,25=10 тонн); конечный элемент типа стальной канат – 12; узлов 362 (количество степеней свободы *n*=2172) и деформированное состояние расчетной конечно-элементной модели при нагрузке испытательным грузом 10 тонн показана на рис.9.

Распределение эквивалентных напряжений в расчетной конечно-элементной модели траверсы ТЛК-8/3 грузоподъемностью 8 тонн при испытательном грузе 10 т: максимальные напряжения в верхних поясных листах коробчатых продольных балок из двух швеллеров №16 в местах крепления гнутых проушин из прутка ∅30мм $\sigma_{экв}$=78 МПа показано на рис.10.

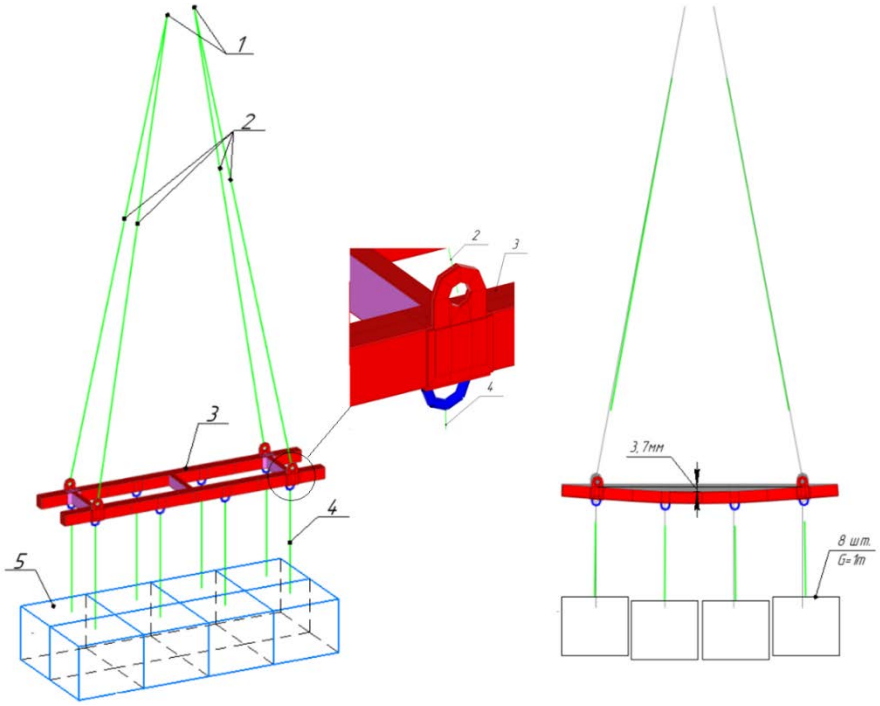


Рис. 9. Расчетная конечно-элементная модель траверсы ТЛК-8/3 и ее деформированное состояние: 1 – крюковая подвеска крана; 2 –четырехветвевой строп; 3 – металлоконструкция траверсы; 4 – одноветвевой строп; 5 – груз (биг-бэги)

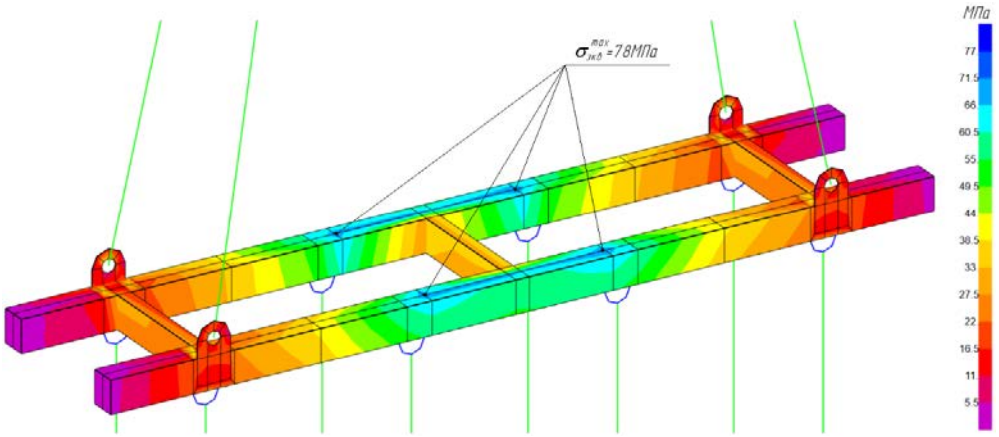


Рис. 10. Распределение эквивалентных напряжений в расчетной конечно-элементной модели траверсы ТЛК-8/3

Решение уравнения (5) применительно к конечно-элементным моделям проектируемых траверс ТЛК-12/3,35 напряженным состоянием по формуле (1), согласно которой коэффициент запаса прочности пролетных балок и грузовых элементов составляют $\frac{209}{82,9} = 2,52$ (см. рис. 7), где в качестве допустимой величины прогиб принят $^1/_{500}$ базовой длины траверсы.

Для траверсы ТЛК-12/1/4 в наибольшем напряженном состоянии находится несущие металлоконструкции грузовой платформы (см. рис. 8) коэффициент запаса прочности которой составляет $\frac{209}{111,8} = 1,8$, а прогибы пролетных балок платформы, благодаря настилу и распределенной полезной нагрузке, обеспечиваемой жесткостью грузовых полет, не превышает допустимую величину $^1/_{500} \times 3000 = 6$ мм.

Заранее разработанные технологии перегрузочных работ, определяющие последовательность операции с использованием технических средств и трудовых ресурсов, обеспечивают наименьшие затраты при перевалке груза в портах и терминалах.

Одну из главенствующих ролей при этом играют траверсы СГП, проектированию которых на основе конечно-элементного анализа посвящена данная работа. Авторами предложено современное видение дальнейшего развития теории и практики проектирования траверсных СГП с применением численных методов расчетного анализа, в отличии от [3].

Внедрение траверс, позволяет грузовому порту с минимальными затратами сократить количество поврежденных МКР и сократить расходы на закупку новых МКР (для перетарки). Это способствует также увеличению производительность перегрузочного процесса порта, что было подтверждено теоретическими расчетами и в результате эксплуатации траверс в ООО «Альфа-Порт» (г. Астрахань).

Список литературы

1. Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения / Федеральные нормы и правила// утв. Приказом Ростехнадзора от 26.11.2020 №461. 56 с.

2. ГОСТ 32579.1 - 2013. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. В 5-ти частях. Часть 1. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2015. 15 с.

3. Грузозахватные приспособления и тара: Учебное пособие/М.Н. Хальфин [и др.]; под общей ред. М.Н. Хальфина. Ростов н/Д.: Феникс, 2006. 144 с.

4. ГОСТ 18778-80*. Траверсы трехопорные. Конструкция и размеры. Переиздание (декабрь 1986 г.) с Изменением № 1, утвержденным в декабре 1985 г. (ИУС № 4-86). М.: Стандартинформ, 1980. 3 с.

5. Панасенко Н.Н., Дульгер Н.В. Проектирование и расчетный анализ траверсы для длинномерных портовых грузов // Наука и практика – 2019. Всероссийская междисциплинарная научная конференция: материалы. ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». Астрахань: Изд-во АГТУ, 2019. С. 107.

6. РД 36-62-2000. Оборудование грузоподъемное. Общие технические требования. М.: Изд-во ВПКТИмонтажстроймеханизация, 2000. 146 с.

7. ГОСТ 28609-90. Краны грузоподъемные. Основные положения расчета. М.: Изд-во стандартов, 1990. 8с.

8. ГОСТ 32578-2013. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Требования к материалам. М.: Стандартинформ, 2015. 8с.

9. Методика поверочного расчета мостовых кранов на основе метода предельных состояний // Н.Н. Панасенко, Р.К. Асадулин // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2006. № 2 (31). С. 83-90.

10. Математическая модель базовых конечных элементов в конечно-элементной теории портовых подъемных сооружений / Н.Н. Панасенко, А.В. Синельщиков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2018. № 1. С. 109-128.

11. Конечно-элементный анализ сейсмостойкости грузоподъемных кранов на основе двухмерных конечных элементов/ А.В. Синельщиков, Н.Н. Панасенко // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. Вып. № 1 (27). С. 56-73.

Дульгер Надежда Валерьевна, канд. техн. наук, доцент, ndulger@yandex.ru, Россия, Астрахань, Астраханский государственный технический университет,

Кораблин Анатолий Викторович, канд. техн. наук, доцент, a.korablin@astu.org, Россия, Астрахань, Астраханский государственный технический университет

DESIGN OF CARGO-CARRYING TRAVERSE FOR PORT CARGO

N.V. Dulger, A.V. Korablin

Modern technical means of transshipment equipment for transshipment and transshipment of port cargo create a reserve of port capacity, contribute to the growth of cargo turnover and accelerate the processing of ships. The article presents the results of the design of removable lifting cranes. For the sea terminal of Alfa-Port (Astrakhan), designs of flat-space traverses have been developed for lifting and moving bulk cargoes in soft specialized containers weighing 1-1.5 tons each using numerical methods of computational analysis and the finite element method.

Key words: removable lifting device, traverse, design, computational analysis, finite element method.

Dulger Nadezhda Valeryevna, candidate of technical sciences, docent, ndulger@yandex.ru, Russia, Astrakhan, Astrakhan State Technical University,

Korablin Anatoly Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, a.korablin@astu.org, Russia, Astrakhan, Astrakhan State Technical University

УДК 656.072.5:004.9
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-644-645

МЕТОД БИНАРНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ АНАЛИЗА ТРАЕКТОРИЙ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ

С.Ю. Лозовая, Н.М. Лозовой, А.Е. Боровской, С.И. Анциферов

В работе предлагается новый метод фиксации параметров дорожного движения, позволяющий определять направление проезда транспортным средством пересечения любой сложности и геометрической конфигурации. Анализ типов нейронных сетей показал, что для задач распознавания визуальных образов наиболее целесообразно использовать сверточную нейронную сеть. Новый метод основан на идее приведения траектории к единому формату в виде бинарных матриц, характеризующих зону, внутри которой осуществляется движение в конкретном направлении. Формирование групп происходит за счет перекрестного сравнения матриц. Была разработана структура слоев сети, собрана обучающая выборка, проведено обучение. Апробация нового метода производилась на участке улично-дорожной сети города Белгорода Российской Федерации, одном из крупнейших и наиболее загруженном пересечении ул. Губкина и пр. Ватутина с правым поворотом на ул. Красноармейскую, при этом точность работы сети составила 81%. В развитие метода бинарных матриц, для повышения точности детектирования на более сложных пересечениях с большим количеством полос, чем в рассматриваемом, при резком изменении: направления, скорости движения, остановки, целесообразно использовать данные, получаемые в результате зональной разметки. При комплексном использовании метода бинарных матриц и зональной разметки получены значения точности измерения 89%.

Ключевые слова: параметры дорожного движения на пересечениях, сверточная нейронная сеть, бинарная матрица, улично-дорожная сеть, карта потоков, зональная разметка.

В настоящее время в современных городах пересечения являются крупными объектами видеофиксации с нерационально используемым основным ресурсом – видеопотоком. Фиксация необходимых характеристик исследуемого объекта (подсчет количества, направление проезда транспортным средством пересечения любой сложности и геометрической конфигурации, интенсивность движения по направлениям и др.) из видеопотока актуальна, тем не менее в данной сфере нет стандартного решения для осуществления извлечение такой информации. При этом заключительной задачей при реализации системы интенсивности по направлениям выступает задача непосредственного подсчета. Ключевым элементом, в данном случае, выступает кластеризация зафиксированных траекторий, то есть распределение траекторий в разные группы по признаку их принадлежности тому или иному направлению.

Предлагается новый метод фиксации параметров дорожного движения на пересечениях, который в отличии от его аналогов [1-4] позволит производить не только подсчет, но определять направление проезда транспортным средством пересечения любой сложности и геометрической конфигурации. Для анализа обозначенного набора характеристик необходима кластеризация траекторий на группы по направлениям движения для формирования бинарной маски переднего плана и фона, которая направляется на вход специально обученному каскадному классификатору. Для реализации системы классификации были проанализированы различные типы нейронных сетей, который показал, что для задач распознавания визуальных образов наиболее целесообразно использовать сверточную нейронную сеть [5, 6]. В развитие метода бинарных матриц, для повышения точности детектирования на более сложных пересечениях с большим количеством полос, чем в рассматриваемом, при резком изменении: направления, скорости движения, остановки, целесообразно использовать данные, получаемые в результате зональной разметки.

Апробация нового метода производилась на участке улично-дорожной сети г. Белгорода Российской Федерации, одном из крупнейших и наиболее загруженном пересечении ул. Губкина – пр. Ватутина (рис. 1). Время съемки: 07.06.2024 г. 14:16:15 – 14:26:14. Подходы к пересечению имеют по три полосы движения с разделительными полосами, при широко представленным канализированным движением во всех направлениях. На пересечение осуществляется светофорное регулирование, движение происходит в трех фазах. На пересечении дорожной разметкой выделено дополнительное направление движение для съезда на прилегающую территорию. Почти во всех направлениях интенсивность транспортных потоков имеет значения близкие к максимальной пропускной способности пересечения.



Рис. 1. Совокупность траекторий участка улично-дорожной сети, подлежащих анализу на пересечении ул. Губкина – пр. Ватутина с правым поворотом на ул. Красноармейскую г. Белгорода Российской Федерации

Новый метод, основан на идее приведения траектории к единому формату в виде бинарных матриц и зональной разметки. В данном случае под бинарной матрицей понимается матрица, характеризующая зону, внутри которой осуществляется движение в конкретном направлении. Т.е. формирование групп происходит за счет перекрестного сравнения матриц, а не траекторий. Предполагается, что бинарные матрицы траекторий одного направления будут иметь минимальные различия друг с другом, не зависимо от расстояния до места фиксации, полосы движения и пр.

Так же формирование бинарных матриц предполагает анализ транспортных потоков в контролируемой зоне, составление секторных карт, характеризующих зоны, средний вектор движения в которых находится в одном из нескольких секторов круга. Затем на основе секторных карт составляются бинарные матрицы для каждой траектории.

Алгоритм нового метода фиксации параметров дорожного движения:

1. Составление карты потоков для их анализа. Картой потоков в рассматриваемом методе является матрица, элементами которой являются единичные векторы, характеризующие среднее направление движения в данной точке, для этого производится визуализация исходных траекторий (рис. 1), на основе которых происходит формирование карты потоков (рис. 2).

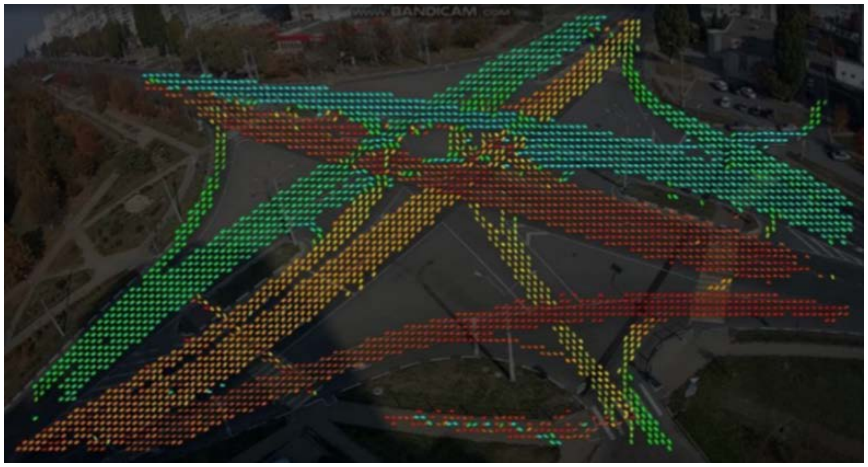


Рис. 2. Карта потоков на пересечении улично-дорожной сети ул. Губкина – пр. Ватутина с правым поворотом на ул. Красноармейскую участка г. Белгорода Российской Федерации

2. Формирование секторных карт для заданного количества секторов по карте потоков. Секторной картой в рассматриваемом методе является матрица, значения элементов которой определяются количеством векторов, принадлежащих заданному сектору, в окрестности данной точки. Секторная карта не является бинарной и имеет плавный градиент на границах потоков. Кроме того, при расчете карт, сектора задаются с перекрытием на половину соседнего. Так, например, при задании размера сектора в 45˚ будут сформированы такие сектора: 0 – 45 ˚, 22,5 – 67,5 ˚, 45 – 90 ˚ и т. д.

3. Создание бинарных матриц траекторий. На каждой точке траектории вычисляется вектор направления движения объекта, в зависимости от которого выбираются три ближайшие секторные карты. Затем в каждой из этик карт выделяется некоторая окрестность вокруг данной точки. Величина этой окрестности должна быть достаточна для охвата наиболее широкого участка, по которому осуществляется движение какого-либо одного транспортного потока. В выбранных секторных картах указанные окрестности данной точки, представляющие собой матрицы, суммируются, а затем результат суммирования бинаризируется и вставляется в формирующуюся бинарную матрицу. Добавление очередного участка происходит по правилу логического сложения (рис. 3).



Рис. 3. Пример наложения бинарной матрицы траектории на карту потоков пересечения ул. Губкина – пр. Ватутина с правым поворотом на ул. Красноармейскую: Красным обозначены входные зоны, зеленым – проходные, синим – выходные на пересечении

4. Группировка траекторий. На основании рассчитанных бинарных карт производится группировка траекторий, для этого считается степень пересечения карт всех траекторий [7]. При этом в качестве критерия сравнения можно дополнительно учитывать усредненный вектор движения.

Бинарные карты траекторий обозначены разными цветами (рис. 4, направления (рис. 3) *А* – красный, *В* - розовый), в зависимости от усредненного вектора направления движения. Для одного и того же направления точность работы сети на составила 81% [7], но, иногда матрица траектории может отличаться от карты потока. Это происходит, в основном, из-за того, что не все автомобили удается надежно отслеживать на всем протяжении их движения по пересечению, в результате чего протяженность и местоположения траекторий в одном и том-же направлении несколько различаться.



Рис. 4. Бинарные матрицы траекторий для трех направлений (рис. 3) движения на пересечении ул. Губкина – пр. Ватутина с правым поворотом на ул. Красноармейскую

В развитие метода бинарных матриц, для повышения точности детектирования [8, 9] на более сложных пересечениях с большим количеством полос, чем в рассматриваемом, при резком изменении: направления, скорости движения, остановки, целесообразно дополнительно использовать данные, получаемые в результате зональной разметки.

5. Зональная разметка контролируемого пересечения. Зональная разметка подразумевает выделение специальных зон на пересечении (рис. 5) и подходах к нему, указание возможных переходов из одной зоны (четырехугольная область, через которую фиксируется прохождение автомобилей) в другую. При этом по смыслу зоны делятся на входные, проходные и выходные (рис 5, красный - входные зоны, зеленый – проходные, фиолетовый – выходные).

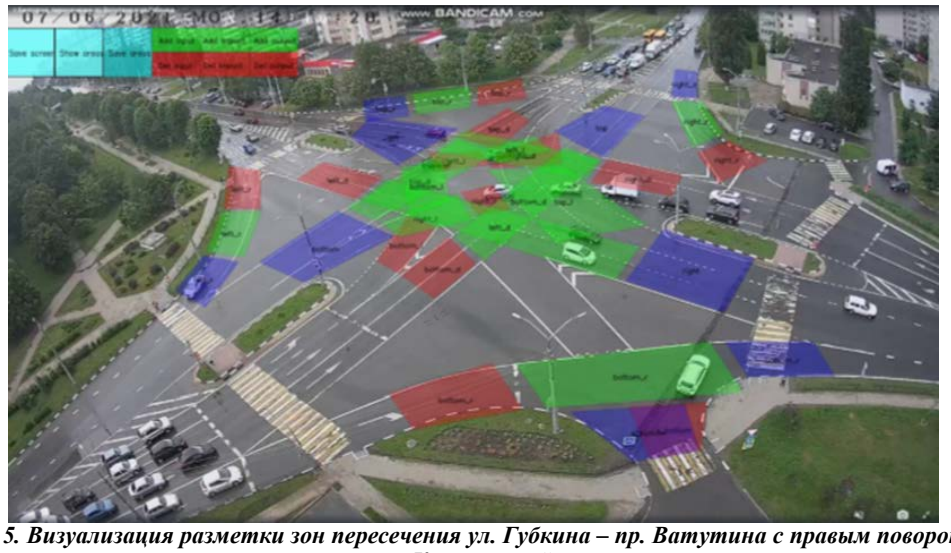


Рис. 5. Визуализация разметки зон пересечения ул. Губкина – пр. Ватутина с правым поворотом на ул. Красноармейскую

Каждая зона связана с другими зонами, в которые допускается переход из данной. Зоны могут пересекаться между собой, это не создает проблем, так как есть жестко прописанные возможные переходы между ними и установленный приоритет фиксации попадания. Под маршрутом понимается определенная последовательность зон, начинающаяся с входной, и заканчивающаяся выходной, между которыми может быть произвольное количество транзитных зон. Путь – последовательность зон, через которые проходит траектория, при этом зоны должны быть последовательно связаны, в противном случае считается, что траектория является ошибочной.

Исходными данными для начала подсчета, помимо размеченных зон, выступает список зарегистрированных траекторий. При применении системы классификации, для каждого класса формируется свой список траекторий и проводится отдельная его обработка.

При первом запуске системы подсчета производится инициализация. На этом этапе формируется список всех возможных маршрутов исходя из конфигурации размеченных зон. Алгоритм формирования маршрутов предусматривает обход в цикле всех входных зон. На каждой итерации происходит построение всех возможных маршрутов, начинающихся в рассматриваемой зоне. Как правило, транзитные зоны являются обычно взаимосвязанными, поэтому в алгоритме имеется защита от зацикливания, посредством запрета включения в маршрут одной и той же транзитной зоны более одного раза.

После этапа инициализации через определенные промежутки времени обрабатываются массивы траекторий. Алгоритм анализа траекторий предполагает вычисление пройденного пути относительно размеченных зон. Для этого все точки последовательно анализируются на предмет попадания в одну из возможных зон. При этом возможными зонами являются только те, в которые возможен переход из последней зоны на пути следования транспортного средства, кроме случая начала отслеживания. Таким образом на протяжении всей траектории регистрируются события входа и выхода, в результате чего формируется полный маршрут. Если путь включает в себя последовательности по типу «выход – вход», то такие последовательности разбиваются на два и более пути в местах перехода из входной зоны в выходную. Такие ситуации возникают, когда отслеживаемый объект выходит из кадра в тот момент, когда в непосредственной близости от места его выхода в кадр входит и начинает детектироваться другой автомобиль.

Здесь отличие от обычной полносвязной, в сверточной сети слои локально связаны [10]. Это позволяет не терять информацию о положении признаков на изображении. Операция свертки представляет собой последовательное прохождение локальных областей изображения через небольшую нейросеть, состоящую из одного слоя, называемую ядром свертки. Каждый сверточный слой может иметь множество таких ядер, каждое из которых занимается выделением определенного признака на всем изображении.

Пересечение пр. Ватутина – ул. Губкина города Белгорода почти во всех направлениях интенсивность транспортных потоков имеет значения, близкие к пропускной способности (см. Рис. 2, б), где прилегающая территория имеет наложенные входную и выходную зоны. Канализированные правоповоротные съезды размечены каждый своим набором из трех зон. Прямые и лево поворотные направления имеют по одной общей выходной зоне, остальные зоны также обслуживают только по одному из этих направлений движения. Зоны имею названия согласно своему расположению соответственно *“bottom”, “right”, “top”, “lef”t* и *“s_bottom”* для съезда на примыкающую территорию. Всего в общей сложности на данном пересечении размечены 34 контрольных зоны.

Результаты подсчета интенсивности на данном участке приведены в таблице. Буквы *B, R, T, L* и *sB* указывают на соответствующие входные и выходные зоны. В колонках, обозначенных буквами *K* и *A* приведены, соответственно, результаты комплекса метод бинарных матриц - зональная разметка и автоматического подсчетов.

Результаты работы комплекса метод бинарных матриц - зональная разметка и без нее на точность определения интенсивности на пересечении пр. Ватутина – ул. Губкина

Параметры	**B**		**R**		**T**		**L**		**sB**	
Подсчет	**K**	**A**	**K**	**A**	**K**	**A**	**K**	**A**	**K**	**A**
B	–	–	30	38	72	75	42	36	1	1
R	*20*	*1*	–	–	*86*	*66*	*118*	*102*	–	–
T	*56*	*48*	*109*	*41*	–	–	*10*	*11*	–	–
L	*33*	*19*	*116*	*74*	*8*	*4*	–	–	–	–
sB	–	–	*8*	*6*	–	–	–	–	–	–

Среди наиболее нагруженных направлений можно выделить *R-L, L-R* и *T-R*. В первом из представленных направлений программа допустила отклонение в меньшую сторону всего на 16 автомобилей при общем числе 118. По направлению *L-R* точность измерения не менее высока. Некоторая доля погрешности приходится на левоповоротное направление *T-R*, что необходимо учитывать при совершенствовании алгоритмов работы системы

Был предложен новый метод фиксации параметров дорожного движения, позволяющий определять направление проезда транспортным средством пересечения любой сложности и геометрической конфигурации, который основан на идее приведения траектории к единому формату в виде бинарных матриц:

разработана структура слоев сети, собрана обучающая выборка, проведено обучение;

имеет место быть высокая степень схожести бинарных карт для параллельных разнонаправленных траекторий на узкой дороге;

апробация нового метода на участке улично-дорожной сети города Белгорода Российской Федерации, одном из крупнейших и наиболее загруженном пересечении улицы Губкина – проспекта Ватутина с правым поворотом на улицу Красноармейскую - точность работы сети на основе метода бинарных матриц составила 81%, применение сети в итоговой системе значительно повышает вычислительную нагрузку;

точность работы сети в комплексе с зональной разметкой по определению интенсивности движения на пересечении показали, что ее большее повышение имеет место у движущихся в прямом направлении транспортных потоков и при остановке транспортного средства, чуть меньше точность детектирования при достаточно резком изменении направления и скорости движения, но при этом получены значения точности измерения 89 %.

Направление дальнейших исследований в данной области связаны с повышением надежности работы системы за счет совершенствования разработанного алгоритма слежения, а также разработка методов детектирования недавно остановившихся автомобилей.

Данная работа выполнена с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № *FZWN*_2024-0011 "Разработка адаптивного и вариабельного комплекса беспилотных авиационных систем для инфраструктурных задач на основе технологии цифровых двойников."

Список литературы

1.Бондарь А.С. Сочетание метода Виолы-Джонса и алгоритма обнаружения движущихся объектов в системе автоматического расчета интенсивности транспортных потоков / А. С. Бондарь, М. В. Головкин // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 1. С. 75-80.

2.Головкин М.В. Алгоритм автоматического подсчета пассажиров по видеопотоку в общественном транспорте / М. В. Головкин, А. С. Бондарь // Журнал "Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования". 2020. № 1. С. 185-191.

3.Lozovaya S.Yu. Development of an algorithm for monitoring moving objects to form their movement trajectories using uas / Lozovaya S.Yu., Lozovoy N.M., Borovskoi A.E. // Proceedings of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” - Reports in English. August 14, 2024. Beijing, China, PRC.Part 2. P. 127-132. DOI 10.34660/INF.2024.24.43.103.

4.Корепанов С.Е. Алгоритм слежения за движущимися объектами в бортовых видеоинформационных системах / С. Е. Корепанов, В. В. Стротов // Цифровая обработка сигналов. 2011. №3. [Электронный ресурс] URL: http://www.dspa.ru/articles/year2011/jour11_3/art11_3_4.pdf (дата публикации: 24.10.2019).

5.Degotinsky N.A. Modern convolutional neural networks for image recognition / N. A. Degotinsky // Collection of reports. In 3 parts. Part 1. Technical sciences. 2017. From 77-83.

6.Y. LeCun Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition / Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard and L. D. Jackel // Neural Computation. Winter 1989. Vol. 1. No. 4. P. 541-551.

7.Бондарь А.С. Классификация автомобилей в системе автоматического расчета интенсивности транспортных потоков / А. С. Бондарь, М. В. Головкин, А. Е. Боровской – Текст: электронный // Материалы Международной студенческой научной конференции. Москва, 2020. С. 58-61.

8.Андриянов Н.А. Обнаружение объектов на изображении: от критериев Байеса и Неймана–Пирсона к детекторам на базе нейронных сетей EfficientDet / Н.А. Андриянов, В.Е. Дементьев, А.Г. Ташлинский // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 1. С. 139-159. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-922.

9.Гай В.Е. Метод обнаружения объектов на изображении с позиций теории активного восприятия / В. Е. Гай, В. А. Утробин, Е. Н. Викулова, Н. А. Никифоров, Н. Н. Макаров, Д. А. Ляхманов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева 2018, № 1 (120). С. 9-15.

10. Bodla N. Improving Object Detection With One Line of Code / N. Bodla [et al.] // arXiv preprint arXiv:1704.04503. 2017.

Лозовая Светлана Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, lozwa@mail.ru, Россия, Белгород, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,

Лозовой Николай Михайлович, канд. техн. наук, доцент, lozwa88@mail.ru, Россия, Белгород, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,

Боровской Алексей Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, a.e.borovskoy@gmail.com, Россия, Белгород, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,

Анциферов Сергей Игоревич, канд. техн. наук, доцент, anciferov.sergey@gmail.com, Россия, Белгород, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

THE BINARY MATRIX METHOD FOR ANALYZING THE TRAJECTORIES OF TRAFFIC FLOWS AT INTERSECTIONS

S.Yu. Lozovaya, N.M. Lozovoy, A.E. Borovskoy, S.I. Antsiferov

The paper proposes a new method for fixing traffic parameters, which allows determining the direction of passage by a vehicle crossing of any complexity and geometric configuration. An analysis of the types of neural networks has shown that it is most appropriate to use a convolutional neural network for visual image recognition tasks. The new method is based on the idea of bringing the trajectory to a single format in the form of binary matrices characterizing the zone within which movement in a particular direction is carried out. The groups are formed by cross-comparing the matrices. The structure of the network layers was developed, a training sample was collected, and training was conducted. The new method was tested on a section of the Belgorod city road network of the Russian Federation, one of the largest and busiest intersections of Gubkin Street and Vatutina avenue with a right turn on Krasnoarmeyskaya St., while the accuracy of the network was 84%. In the development of the binary matrix method, in order to increase the detection accuracy at more complex intersections with a larger number of lanes than in the one under consideration, with a sharp change in direction, speed, and stop, it is advisable to additionally use the data obtained as a result of zonal marking. With the complex use of the binary matrix method and zonal marking, measurement accuracy values of 89% were obtained.

Key words: traffic parameters at intersections, convolutional neural network, binary matrix, road network, flow map, zonal marking.

Lozovaya Svetlana Yurievna, doctor of technical sciences, professor, lozwa@mail.ru, Russia, Belgorod, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov,

Lozovoy Nikolay Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, lozwa88@mail.ru, Russia, Belgorod, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov,

Borovskoi Alexey Evgenievich, candidate of technical sciences, docent, a.e.borovskoy@gmail.com, Russia. Belgorod, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov,

Antsiferov Sergey Igorevich, candidate of technical sciences, docent, anciferov.sergey@gmail.com, Russia. Belgorod, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

УДК 621.8
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-649-650

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ В ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

А.О. Дворянкин, Н.И. Баурова

В статье рассматриваются перспективы применения разработанной технологии, сочетающей в себе литье по выплавляемым моделям и 3D печать. Проведено сравнение с традиционными технологиями изготовления деталей наземно-транспортно технологических машин и комплексов на примере опорно-поворотного устройства автокрана. Подробно отражены минусы использования литья по выплавляемым моделям без использования 3D мастер-моделей и изготовленных на их основе силиконовых форм, на примере изготовления литейной оснастки. Показано что предложенная технология позволит производственным предприятиям сократить трудоёмкость при изготовлении различных деталей наземных транспортно-технологических машин и комплексов.

Ключевые слова: литейное производство, 3D печать, термопластические полимеры, опорно-поворотное устройство, силиконовые формы.

Появление инновационных технологий изготовления деталей наземных транспортно-технологических машин и комплексов или внесение изменений в уже существующие технологические процессы, а также увеличение промышленного комплекса в условиях импортозамещения требует от производственных предприятий и организаций, комплексного подхода при решении задач соблюдения установленных технологических параметров [1-2].

Известно, что совокупность показателей свойств, определяющих уровень надежности узлов и деталей, закладывается на этапе проектирования, при этом важно обеспечить высокую точность получения заготовки детали. Чем выше качество заготовки, тем меньше механических операций потребуется для придания детали определенной геометрической формы, размеров и достижения наименьшей шероховатости поверхности.

К инновационным, позволяющим изготавливать наиболее точные заготовки, следует отнести технологии 3D-печати, которые в настоящее время являются одними из перспективных технологий, используемых при создании деталей машин.

В качестве основных преимуществ данных технологий следует отметить возможность создания из термопластических полимерных композиционных материалов изделий сложной формы и конфигураций с высоким качеством поверхности, способных выдерживать определенные температуры и нагрузки, не подвергаясь деформации, что позволяет производственным предприятиям существенно расширить номенклатуру производимой продукции [3].

Одним из наиболее перспективных отраслей производства, где применение 3D печати наиболее актуально, является литейное производство, так как при создании новой продукции в опытном производстве проблема снижения трудоёмкости, а также быстрого изготовления деталей наземных транспортно-технологических машин и комплексов, становится ключевой [3-4].

В промышленном производстве преимущественно используются традиционные методы изготовления литейной оснастки (вручную или с использованием механообрабатывающего оборудования). Это связано с тем, что на этапе проектирования, когда итоговый результат не известен, конструкция изделия ещё не отработана и не утверждена, для изготовления образцов нецелесообразно создавать технологическую оснастку под серийное производство. Следовательно, такая литейная оснастка является разовой, и в дальнейшей работе над изделием не используется. Поэтому каждое изменение конструкции, для придания ей нужной формы, требует новой технологической оснастки. Правка старой конструкции является весьма трудоёмким процессом и не всегда возможна. В связи с этим традиционные методы являются дорогостоящими из-за высокой материалоемкости и трудоемкости по сравнению с рассматриваемыми технологиями [5-6].

Целью данной работы является определение эффективности внедрения технологий 3D печати в литейное производство при изготовлении деталей наземных транспортно-технологических машин и комплексов.

Объектом исследования является разработанная авторами данной статьи технология, совмещающая 3D печать и литейное производство и используемая при изготовлении деталей наземных транспортно-технологических машин и комплексов.

В качестве методов исследования был применен расчет технико-экономической эффективности от внедрения технологии в производство.

На основании ранее проведенного литературного анализа было выявлено, что технологией литья, которую целесообразно использовать совместно с 3D печатью при изготовлении деталей машин, является литье по выплавляемым моделям [3-4].

Данный тип литья считается методом, обеспечивающим наилучшие показатели точности размеров и шероховатости поверхности изготавливаемых отливок, что позволяет снизить себестоимость готовых деталей за счет исключения или выполнения с минимальными припусками механической обработки.

В традиционном виде, цикл литья по выплавляемым моделям является трудоёмким процессом и применяется в мелкосерийном производстве, так как подразумевает индивидуальный подход при разработке и создании выплавляемой модели, а также подготовке оснастки под выплавляемую модель, что не целесообразно при массовом производстве, так как увеличивает себестоимость изготавливаемой продукции [7-8].

Однако применение литья по выплавляемым моделям совместно с мастер-моделями, изготовленными по технологии FDM 3D печати, а также созданными на их основе силиконовыми формами, позволяет расширить номенклатуру производимой продукции, при этом исключив индивидуальный подход при изготовлении деталей. Использование напечатанных мастер-моделей позволяет получить результаты, недостижимые средствами классических технологических процессов. Важное преимущество данной технологии заключается в значительной экономии времени на изготовление литейной и модельной оснастки. Модели, напечатанные на 3D принтере, могут быть гораздо тоньше, чем стандартно производимые в пресс-формах из пенополистирола [8-9].

Последовательность основных этапов технологического процесса применения 3D печати совместно с литьем при изготовлении деталей наземных транспортно-технологических машин представлена на рисунке.



Блок-схема разработанной технологии

При проведении технико-экономического анализа в качестве изготавливаемой детали было выбрано зубчатое колесо опорно-поворотного устройства автокрана.

Зубчатое колесо поворотного механизма автокрана имеет крупные размеры и как правило для его изготовления используются такие технологии как штамповка с последующим нарезанием зубьев, штамповка с последующей накаткой зубьев, литье в песчано-глинистые формы, а также в индивидуальных случаях литье по выплавляемым моделям.

В рамках технико-экономического анализа сравнивалась себестоимость изготовления зубчатого колеса традиционными и разработанной технологией, в качестве параметров при расчете учитывались затраты на материалы, заработную плату производственных рабочих, а также на электроэнергию и амортизационные отчисления на используемое оборудование в зависимости от используемой технологии производства результаты представлены в таблице [10-11].

Себестоимость изготовления зубчатого колеса опорно-поворотного устройства

Технология производства	Себестоимость изготовления 1 ед., руб.	Себестоимость изготовления 10 ед., руб.
Штамповка с последующим нарезанием зубьев	223 689	1 395 950
Штамповка с последующей накаткой зубьев	211 364	1 310 950
Литье в песчано-глинистые формы	274 246	1 572 800
Литье по выплавляемым моделям	312 991	1 499 380
Литье по выплавляемым 3D моделям с применением ABS пластика	1 583 312	1 026 697

Также учитывались особенности каждой из технологий. Для разработанной технологии общее количество силиконовых форм на основании одной 3D мастер-модели, заложенных при расчете было равно 10 шт.

По результатам технико-экономического анализа определено, что с увеличением объемов производства применение предложенной технологии является целесообразным так как физико-механические характеристики силиконовых компаундов, применяемых при создании силиконовых форм на основании напечатанных 3D мастер-моделей из различных термопластичных материалов, позволяют изготавливать силиконовые формы, с прочностными характеристиками позволяющими на основании одной мастер-модели изготавливать от 10 до 40 силиконовых форм.

В таком случае мастер-модель изготавливается единожды и впоследствии на ее основе создается необходимое количество выплавляемых восковых моделей в зависимости от объемов производства.

Результаты проведенного исследования показывают, что внедрение 3D печати в литейное производство при изготовлении деталей наземных транспортно-технологических машин и комплексов является развивающимся перспективным направлением, которое в дальнейшем позволит изготавливать детали с различными свойствами при минимальной трудоёмкости производства.

Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2024-0001.

Список литературы

1. Зорин В.А., Тимченко М.И. Применение аддитивных технологий при изготовлении деталей машин // Механизация строительства. 2018. Т. 79. № 1. С. 5-8.

2. Повышение эффективности производственных систем на основе применения аддитивных технологий: современное состояние и перспективы развития / В.Е. Петров, А.В. Олейник, Д.С. Трубашевский [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 8. С. 88-97.

3. Дворянкин А.О., Баурова Н.И. Особенности применения силиконовых материалов при создании литейных форм на основе 3D мастер-моделей // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 6. С. 37-41.

4. Мосягин И.В. Выбор метода получения изделия требуемой формы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 8. С. 223-225.

5. Садоха М.А., Ровин С.Л. Повышение эффективности производства отливок в условиях мелкосерийного и единичного производства // Литье и металлургия. 2020. № 3. С. 10-14.

6. Гутько Ю.И., Войтенко В.В. Стержневые технологии в литейном производстве: состояние проблемы и перспективы // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2022. № 2(39). С. 17-33.

7. Елисейкин Е.И., Изотов В.А. Комбинированный способ изготовления модельной оснастки // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21. № 4. С. 147-150.

8. Опыт разработки технологии изготовления модельной оснастки для отливок с применением CAD/CAM/CAE систем / Д.С. Чернов, А.В. Матвеев, С.А. Нестеров, Н.В. Сорокина // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 63-2. С. 39-43.

9. Корбанов В.Д. Применение аддитивных технологий при литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2021. № 8. С. 21-22.

10. Нефёлов И.С., Томилина А.А. Технико-экономическое обоснование возможности применения аддитивных технологий при ремонте пластмассовых деталей дорожных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 1. С. 8-11.

11. Балашов А.В., Белопотов С.В., Малышев С.О. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати // Ползуновский вестник. 2016. №2. С. 120-126.

Дворянкин Александр Олегович, аспирант, alol113@yandex.ru, Россия, Москва, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),

Баурова Наталья Ивановна, д-р техн. наук, проф., декан факультета, nbaurova@mail.ru, Россия, Москва, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

PROSPECTS FOR THE INTRODUCTION OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN FOUNDRY PRODUCTION

A.O. Dvoryankin, N.I. Baurova

The article discusses the prospects for the application of the developed technology, which combines die casting and 3D printing. A comparison with traditional manufacturing technologies of parts of ground-transport technological machines and complexes is carried out using the example of a crane support and rotary device. The disadvantages of using die casting without using 3D master models and silicone molds made on their basis are reflected in detail, using the example of manufacturing foundry equipment. It is shown that the proposed technology will allow manufacturing enterprises to reduce the labor intensity in the manufacture of various parts of ground-based transport and technological machines and complexes.

Keywords: Foundry, 3D printing, thermoplastic polymers, pivoting support device, silicone molds.

Dvoryankin Alexander Olegovich, postgraduate, alol113@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow State Automobile and Road Construction University (MADI),

Baurova Natalia Ivanovna, doctor of technical sciences, professor, dean of the faculty, nbaurova@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow State Automobile and Road Construction University (MADI)

УДК 62.112-5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-651-652

ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ УНИФИЦИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ХОДОВОГО ПРИВОДА ЖЕСТКОРАМНЫХ И ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

В.Н. Добромиров, У.Н. Мейке, К.И. Фомин

Отечественная дорожно-строительная отрасль испытывает дефицит большегрузных шарнирно-сочлененных автосамосвалов. Предлагается решение этой проблемы путем создания отечественного образца в составе высоко унифицированного семейства автосамосвалов на базе серийно выпускаемых жесткорамных моделей. При этом возникает необходимость проведения сравнительной расчетной оценки нагруженности унифицированных элементов трансмиссии в базовой жесткорамной и в создаваемой сочлененной машинах. В статье представлены разработанные авторами математические модели, обеспечивающие проведение таких расчетов, и результаты расчетов, подтверждающие принципиальную возможность реализации предложения авторов.

Ключевые слова: строительные автосамосвалы-землевозы, шарнирно-сочлененная компоновка, блокированный привод ведущих мостов, нагрузки в приводе, унификация.

В современном дорожно-строительном производстве широко применяются большегрузные землевозы на базе сочлененных колесных шасси [1, 2]. Применение таких машин в Российской Федерации ограничивается высокой стоимостью их создания на базе специального производства. Решение задачи предлагается путем организации выпуска сочлененных автосамосвалов в составе высоко унифицированных семейств машин производителями серийных большегрузных автосамосвалов. Типовой состав таких транспортных средств: жесткорамные образцы 6х6 (2) и

8х8 (2), седельный автопоезд 6х4 (2) с 3-х осным полуприцепом. Неполноприводные автопоезда используется в звене подвоза грунта к месту складирования на участке линейного дорожного строительства. Одиночные полноприводные образцы 6х6 и 8х8 с двухскатной ошиновкой колес осей задней тележки применяются в звене развоза грунта по возводимой дорожной насыпи [3]. Применение в таких условиях машины с шарнирно-сочлененной рамой более предпочтительно ввиду лучшей опорно-сцепной проходимости и маневренности на ограниченных пространствах [4, 5, 6]. В связи с этим предлагается включение в общую номенклатуру производимых большегрузных строительных автосамосвалов-землевозов машин типа 6х6 и 8х8 с шарнирно-сочлененной рамой и широким использованием в их конструкции унифицированных с жесткорамными машинами узлов и агрегатов, в первую очередь в части элементов привода ходового оборудования. Положительный опыт подобной унификации автомобилей двойного назначения производства КАМАЗа, УРАЛАЗа и БАЗа может быть основой для успешной реализации предлагаемого решения по снижению стоимости создания и производства сочлененных машин. Концептуальный состав существующих и предлагаемого высоко унифицированных семейств машин приведен на рис. 1.

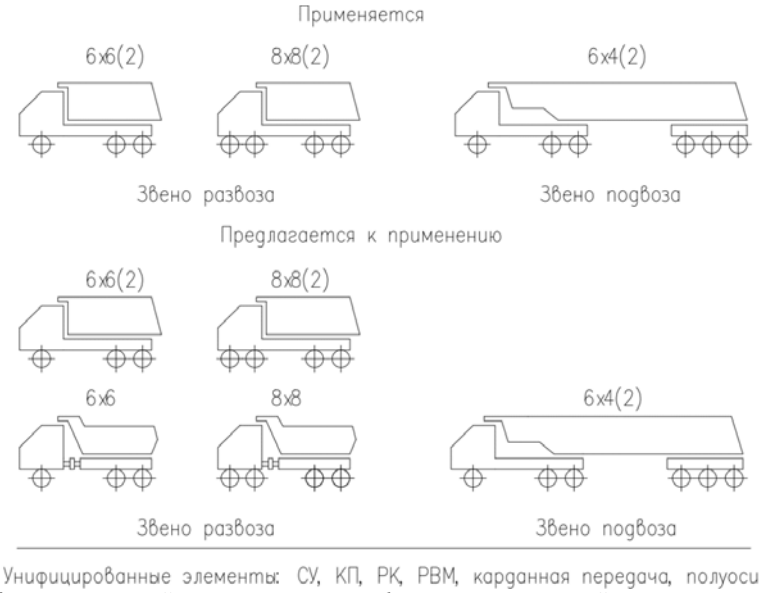


Рис. 1. Концептуальный состав высоко унифицированного семейства автосамосвалов

Спрогнозированные в результате предварительных исследований концептуальный облик и технические характеристики сочлененной машины типа 6х6 для популярного в дорожном строительстве землевоза класса грузоподъемности 25 т представлены на рис. 2 и в табл. 1 вместе с технической информацией о выбранном для сравнения серийном образце-аналоге [7].

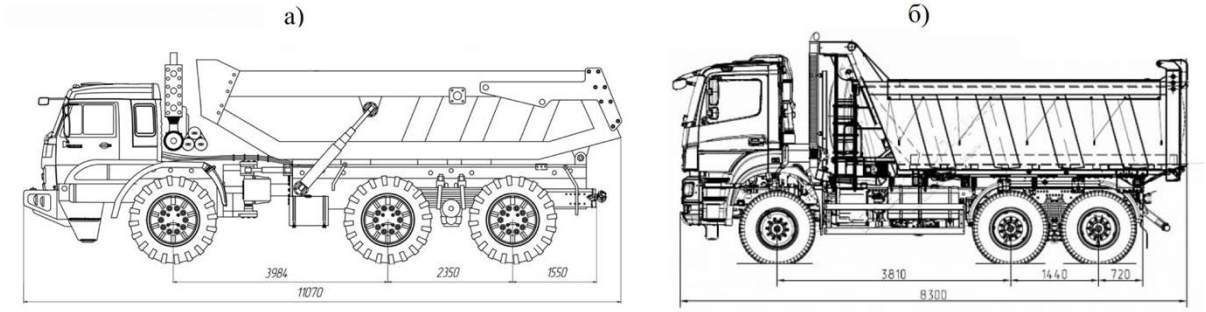


Рис. 2. Концептуальный облик сочлененного автосамосвала (а)
и общий вид его жесткорамного аналога КАМАЗ-65802 (б)

Таблица 1

Технические характеристики гипотетической сочлененной машины и ее серийного жесткорамного аналога

Показатель	Сочлененная машина	КамАЗ 65802
	Параметр	Параметр
Колесная формула	6х6	6х6
Допустимая полная масса автомобиля, кг	42 300	41 000
Масса снаряженного автомобиля, кг	16 700	16 200
Допустимая грузоподъемность, кг	25 600	24 800
Максимальная скорость, км/ч	40	90
Тип и марка двигателя	КАМАЗ 740.37-400	Mersedes-Benz OM 457LA. V/3
Максимальная мощность двигателя, кВт (л.с.)	294 (400) при 1900 об/мин	295 (401) при 1900 об/мин
Максимальный момент двигателя, Нм	1800 при 1300 об/мин	2000 (204) при 1100 об/мин
Тип и марка коробки передач	ZF 12AS1930TD	ZF 16S2225 TO
Число передач КП	12	16

Передаточное числа РК и ГП	$i_{\text{гп}} = 7{,}22$; $i_{\text{РКн}} = 1{,}4$; $i_{\text{РКв}} = 0{,}97$	$i_{\text{гп}} = 5{,}262$; $i_{\text{РКн}} = 1{,}536$; $i_{\text{РКв}} = 0{,}89$
Тип, марка и размерность шин	BKT Ridemax 28LR26 176A8 FL-690 Статический радиус 695 мм	12.00R24 1230x319 Статический радиус 575 мм

Цель исследования – оценка возможности использования в конструкции сочлененной машины узлов и агрегатов трансмиссии, унифицированных с жесткорамным аналогом. В основе определения такой возможности лежит сравнительная оценка их нагруженности при движении в наиболее сложных типовых условиях применения.

Задача исследования. Учитывая специфику влияния шарнирной рамы на распределение тяговых усилий по осям и колесам машины, возникает необходимость проведения сравнительной оценки нагруженности элементов привода ходового оборудования базовой жесткорамной машины и сочлененной в условиях маневрирования на ограниченных пространствах строительных площадок, сопровождающегося возникновением значительных по величине циркулирующих моментов в блокированных контурах привода ведущих осей.

Методы исследования:

– математическое моделирование нагружения трансмиссии колесных многоприводных машин циркулирующими моментами при движении по твердому и деформируемому опорному основанию и при переезде препятствий различного геометрического профиля;

– расчетная сравнительная оценка нагруженности блокированных контуров трансмиссий жесткорамных и шарниро-сочлененных автосамосвалов при маневрировании по возводимой дорожной насыпи: движение с минимальным радиусом поворота по твердому опорному основанию; преодоление препятствий различного геометрического профиля – ров, кювет, эскарп, подъем и спуск крутизной до 30 градусов; движение по деформируемому песчаному опорному основанию.

Математические модели нагружения блокированных контуров трансмиссий.

1. Движение по твердому опорному основанию на повороте.

Расчетная схема для определения нагрузок в блокированных контурах трансмиссии при движении на повороте приведена на рис. 3.

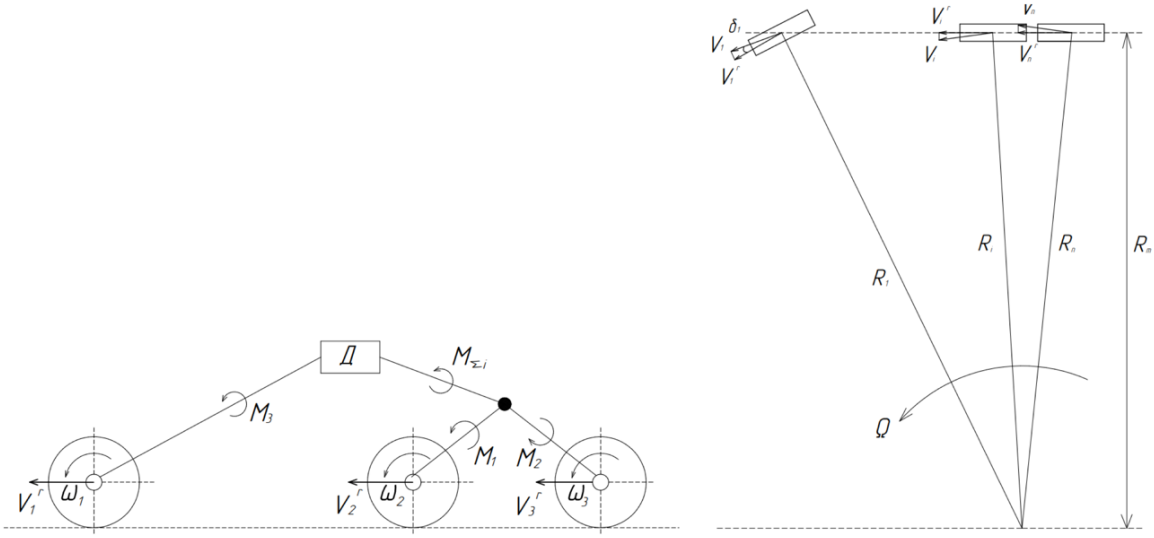


Рис. 3. Расчетная схема определения нагрузок в блокированных контурах трансмиссии при повороте

Расчетные зависимости для определения крутящих моментов, нагружающих оси любого блокированного контура при криволинейном движении с заблокированным межосевым дифференциалом:

$$\mathrm{M}_{\text{к1}} = \frac{r_{\text{кв}i} \cdot \left(\frac{r_{\text{кв1}}}{r_{\text{кв}i}} - \frac{R_1 \cdot \cos\delta_{\text{y1}}}{R_i \cdot \cos\delta_{\text{y}i}} \right)}{\gamma_{\text{пр}i} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot \cos\delta_{\text{y1}}}{R_i \cdot \cos\delta_{\text{y}i}} + \frac{\gamma_{\text{пр1}}}{\gamma_{\text{пр}i}} \right)} + M_{\sum i} \cdot \frac{\frac{R_1 \cdot \cos\delta_{\text{y1}}}{R_i \cdot \cos\delta_{\text{y}i}}}{\frac{R_1 \cdot \cos\delta_{\text{y1}}}{R_i \cdot \cos\delta_{\text{y}i}} + \frac{\gamma_{\text{пр1}}}{\gamma_{\text{пр}i}}};$$

$$\mathrm{M}_{\text{к}i} = \frac{r_{\text{кв}i} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot \cos\delta_{\text{y1}}}{R_i \cdot \cos\delta_{\text{y}i}} - \frac{r_{\text{кв1}}}{r_{\text{кв}i}} \right)}{\gamma_{\text{пр}i} \cdot \left(\frac{R_1 \cdot \cos\delta_{\text{y1}}}{R_i \cdot \cos\delta_{\text{y}i}} + \frac{\gamma_{\text{пр1}}}{\gamma_{\text{пр}i}} \right)} + M_{\sum i} \cdot \frac{\frac{\gamma_{\text{пр1}}}{\gamma_{\text{пр}i}}}{\frac{R_1 \cdot \cos\delta_{\text{y1}}}{R_i \cdot \cos\delta_{\text{y}i}} + \frac{\gamma_{\text{пр1}}}{\gamma_{\text{пр}i}}}, \quad (1)$$

где $\mathrm{M}_{\text{к}}$ – крутящие моменты, нагружающие оси контура; $r_{\text{кв}}$ – радиусы качения колес контура в ведомом режиме; R – радиусы траекторий движения колес контура; $\gamma_{\text{пр}}$ – тангенциальная эластичность шин колес контура; δ_{y} – углы уводов колес осей контура; M_{Σ} – суммарный момент, подведенный к контуру.

2. Движение по препятствиям различного геометрического профиля. Расчетные схемы для определения нагрузок в блокированных контурах трансмиссии при преодолении дорожных препятствий различного геометрического профиля: подъем, кювет, эскарп, спуск – приведены на рис. 4.

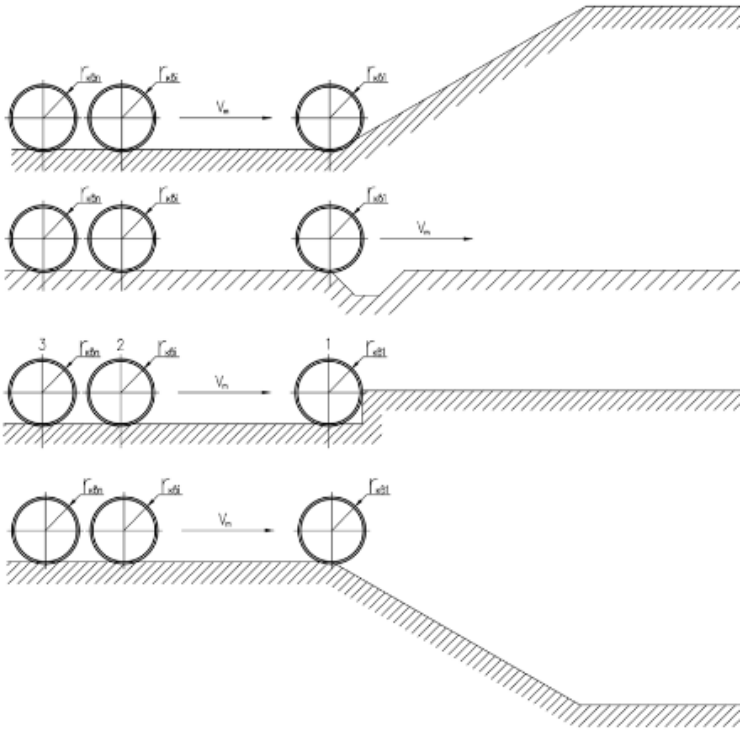


Рис. 4. Расчетные схемы для определения нагрузок в блокированных контурах трансмиссии при преодолении дорожных препятствий различного геометрического профиля

Расчетные зависимости для определения крутящих моментов, нагружающих оси любого блокированного контура при движении с заблокированным межосевым дифференциалом по препятствиям различного геометрического профиля:

$$\mathrm{M}_{к1}=\frac{r_{\text{кв}i}\cdot\left(\frac{r_{\text{кв}1}}{r_{\text{кв}i}}-\frac{S_1}{S_i}\right)}{\gamma_{\text{пр}i}\cdot\left(\frac{S_1}{S_i}+\frac{\gamma_{\text{пр}1}}{\gamma_{\text{пр}i}}\right)}+\mathrm{M}_{\sum i}\cdot\frac{\frac{S_1}{S_i}}{\frac{S_1}{S_i}+\frac{\gamma_{\text{пр}1}}{\gamma_{\text{пр}i}}};$$

$$\mathrm{M}_{ki}=\frac{r_{\text{кв}i}\cdot\left(\frac{S_1}{S_i}-\frac{r_{\text{кв}1}}{r_{\text{кв}i}}\right)}{\gamma_{\text{пр}i}\cdot\left(\frac{S_1}{S_i}+\frac{\gamma_{\text{пр}1}}{\gamma_{\text{пр}i}}\right)}+\mathrm{M}_{\sum i}\cdot\frac{\frac{\gamma_{\text{пр}1}}{\gamma_{\text{пр}i}}}{\frac{S_1}{S_i}+\frac{\gamma_{\text{пр}1}}{\gamma_{\text{пр}i}}}, \qquad (2)$$

где S_1, S_i – пути, проходимые колесами осей контура при преодолении препятствия.

3. Движение по деформируемому грунту. Расчетные зависимости для этого случая движения аналогичны зависимостям (1), отличаются введением и использованием понятия приведенной тангенциальной эластичности шины и грунта $\gamma_{\text{пр}}$. Процесс математического моделирования расчетного определения этого параметра основан на рассмотрении взаимодействия деформируемого колеса с деформируемым грунтом. Значение $\gamma_{\text{пр}}$ при этом определяется из выражения

$$\gamma_{\text{пр}}=\frac{r_{\text{кв}}-r_{\text{кс}}}{\mathrm{M}_{\text{кс}}}, \qquad (3)$$

где $r_{\text{кв}}$ и $r_{\text{кс}}$ – радиусы качения сдеформированного колеса по грунту в условиях колееобразования в ведомом и свободном режимах, $\mathrm{M}_{\text{кс}}$ – крутящий момент, подведенный к колесу.

Расчетная схема (рис. 5) и основные математические зависимости, использованные для расчета, приведены ниже.

Основные расчетные зависимости для определения $\gamma_{\text{пр}}$ по выражению (3) даны в соответствии с [8, 9, 10].

Сила тяги по сцеплению:

$$P_{\varphi\max}=\varphi_{\text{ж}}\cdot G_{\text{к}}\cdot\left[th\left(5\cdot10^{-7}\cdot C_{\text{ш}}\cdot F_{\text{ш}}^{-1}\right)\right]^{-1}, \qquad (4)$$

где $\varphi_{ж}$ – коэффициент сцепления недеформированного колеса с грунтом; $G_{к}$ – нормальная нагрузка на колесо; $F_{ш}$ – площадь плоской зоны контакта с опорной поверхностью; $C_{ш}$ – радиальная жесткость шины.

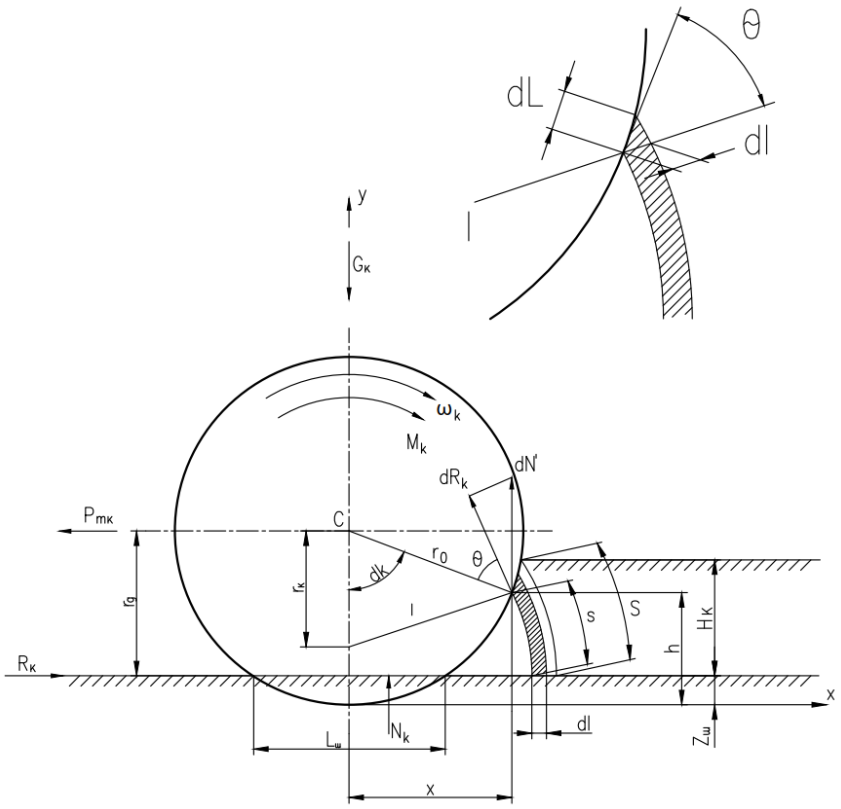


Рис. 5. Расчетная схема взаимодействия эластичного колеса с деформируемым основанием

Глубина колеи:

$$H_{кс} = \left(\frac{C_{ш} \cdot z_{шс}}{C \cdot B_{ш} \cdot 10^{k \cdot \mu} \cdot r_{о}^{\mu(1-n)} \cdot L_{ш}} \right)^{\frac{1}{n\mu}}, \quad (5)$$

где $z_{шс}$ – деформация шины при качении колеса в свободном режиме; C – удельное сопротивление грунта вдавливанию; $B_{ш}$ – ширина шины; k, n – коэффициент s траектории движения материальной точки на поверхности шины по криволинейной зоне контакта с опорной поверхностью; μ – степенной коэффициент изменения сопротивления вдавливанию по глубине; $r_{о}$ – свободный радиус колеса; $L_{ш}$ – длина плоской зоны контакта колеса с опорной поверхностью.

Сопротивление качению колеса в свободном режиме:

$$P_{fгкс} = C \cdot \mathrm{B}_{ш} \cdot 10^{k \cdot \mu} \cdot r_{о}^{\mu(1-n)} \cdot \left(1 - \frac{\mu}{n+1} + \frac{\mu \cdot (\mu+1)}{2 \cdot (2 \cdot n+1)} \right) \times \left[(H_{кс} + z_{шс})^{n\mu+1} - z_{шс}^{n\mu+1} \right]. \quad (6)$$

Радиус качения колеса в свободном режиме:

$$r_{кв} = \delta_{max} \cdot (r_{о} - z_{шс}) \cdot Ln \sqrt{\frac{0{,}97 \cdot P_{fгкс} - 1{,}97 \cdot P_{\varphi max}}{2{,}97 \cdot P_{fгкс} - 1{,}97 \cdot P_{\varphi max}}} + r_{кс} - z_{шс}, \quad (7)$$

где δ_{max} – максимальный коэффициент буксования; $r_{кс}$ – радиус качения колеса в свободном режиме.

Радиус качения колеса в свободном режиме $r_{кс}$ определяется разностью свободного радиуса $r_{о}$ и деформации шины $z_{шс}$ при ее качении в свободном режиме.

Крутящий момент, подведенный к колесу в свободном режиме:

$$\mathrm{M}_{кс} = P_{fгкс} + r_{кс} + f_{ш} \cdot r_{кс}. \quad (8)$$

Последовательный расчет по зависимостям (4)…(8) обеспечивает получение значений $r_{кв}$, $r_{кс}$ и $\mathrm{M}_{кс}$, необходимых для вычисления значения $\gamma_{пр}$.

Сравнительная оценка нагруженности блокированных приводов осей.

Исходные данные для расчета.

Необходимые для расчета технические показатели автосамосвалов и характеристики опорных поверхностей представлены в табл. 2. Расчетные схемы движения жесткорамной и сочлененной машин на повороте с минимальным радиусом приведены на рис. 6.

Таблица 2

Исходные характеристики транспортных средств и опорной поверхности для расчета

Показатель	Размерность	Значение показателя	
		Жесткорамный автосамосвал	Шарнирно-сочлененный автосамосвал
Характеристика транспортного средства (ТС)			
Масса ТС	кг	41 000	42 300
Масса, приходящаяся на ось: 1-я ось 2-я ось 3-я ось	кг	 9 000 16 000 16 000	 0,33 массы ТС 0,33 массы ТС 0,33 массы ТС
Количество колес оси: 1-я ось 2-я ось 3-я ось	шт	 2 2 (двускатные) 2 (двускатные)	 2 2 2
Минимальный радиус поворота: Передней тележки Задней тележки	м	 10,10 8,84	 7,67 6,79
Характеристики шин			
Предельно допустимая нагрузка: Шины 1-й оси Шины 2-й оси Шины 3-й оси	кг	 4 500 8 000 (двускатные) 8 000 (двускатные)	 7 100 7 100 7 100
Ширина профиля шины: Шины 1-й оси Шины 2-й оси Шины 3-й оси	м	 0,319 0,638 (двускатные) 0,638 (двускатные)	 0,719 0,719 0,719
Свободный радиус	м	0,615	0,795
Статический радиус	м	0,575	0,695
Номинальное давление в шине	Па	$8{,}53 \cdot 10^5$	$2{,}80 \cdot 10^5$
Коэффициент сопротивления уводу	кН/рад	70	70
Характеристики опорной поверхности			
Коэффициент сопротивления качению: Песок сухой Асфальтобетон	–	 0,2 0,02	 0,2 0,02
Коэффициент сцепления с поверхностью (песок сухой)	–	0,2	0,2
Коэффициент буксования (песок сухой)	–	0,2	0,2
Удельное сопротивление грунта вдавливанию (песок сухой уплотненный)	Па	$4{,}5 \cdot 10^5$	$4{,}5 \cdot 10^5$
Коэффициент изменения сопротивления грунта вдавливанию (песок сухой уплотненный)	–	0,2	0,2

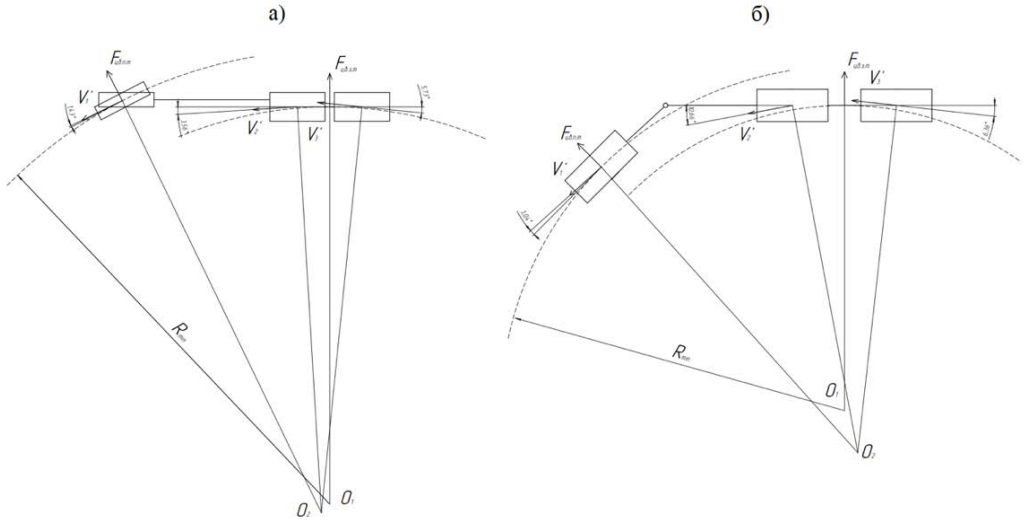


Рис. 6. Расчетные схемы поворотов жесткорамной (а) и сочлененной (б) машин

Результаты исследования. Расчетные нагрузки на осях блокированных контуров транспортных средств при движении по твердой опорной поверхности с минимальным радиусом поворота приведены в табл. 3, при движении по деформируемой песчаной опорной поверхности – в табл. 4, при преодолении препятствий различного профиля – в табл. 5.

Таблица 3

Расчетные нагрузки на осях транспортных средств при движении по твердой опорной поверхности с минимальным радиусом поворота

Контур	Ось	Момент на оси M_i, Н·м	
		Автосамосвал жесткорамный	Автосамосвал сочлененный
2-1	1	–6 274,66	–1 899,93
	2	8 671,98	–5 184,79

3-1	1	–6 259,02	–1 875,05
	3	8 656,34	5 159,91
3-2	2	1 556,83	1 667,37
	3	1 511,74	1 617,49

В соответствии с данными табл. 3 наибольшая величина момента, подведенного к оси для случая движения по твердой опорной поверхности с минимальным радиусом составляет для рамного автосамосвала 8 672 Н·м, для сочлененной машины – 5 185 Н·м.

Таблица 4

Расчетные нагрузки на осях транспортных средств при движении по деформируемой опорной поверхности с минимальным радиусом поворота

Контур	Ось	Момент на оси M_i, Н·м	
		Автосамосвал жесткорамный	Автосамосвал сочлененный
2-1	1	10 197,52	17 646,58
	2	18 006,23	20 998,92
3-1	1	10 197,52	17 646,58
	3	18 006,23	20 998,92
3-2	2	18 050,40	19 322,75
	3	18 050,40	19 322,75

В соответствии с данными табл. 4 наибольшая величина момента, подведенного к оси для случая движения по деформируемой песчаной опорной поверхности, для рамного автосамосвала составляет 18 050 Н·м, для сочлененной машины – 20 998 Н·м.

Таблица 5

Расчетные нагрузки на осях транспортных средств при движении по препятствиям различного геометрического профиля

Препятствие	Контур		Ось		Момент на оси, M_i, Н·м	
	Самосвал жестко-рамный	Самосвал сочленен-ный	Самосвал жестко-рамный	Самосвал сочле-нен-ный	Самосвал жест-ко-рамный	Самосвал сочле-нен-ный
Ров	2-1	2-1	1	1	9 763,56	16 368,61
			2	2	18 440,19	22 267,89
Кювет	2-3	2-3	2	2	17 111,06	17 292,34
			3	3	18 989,74	21 353,17
Эскарп	2-3	2-3	2	2	15 930,26	14 752,49
			3	3	20 170,54	23 893,49
Спуск	2-3	1-2	2	1	18 910,25	21 300,14
			3	2	17 190,55	17 345,37
Подъем	2-3	1-2	2	1	17 189,26	21 323,41
			3	2	18 911,54	17 322,10

По данным табл. 5 наибольшая величина момента, подведенного к оси при движении по препятствиям различного геометрического профиля, возникает при преодолении эскарпа и составляет для рамного автосамосвала 20 171 Н·м, для сочлененной машины – 23 893 Н·м.

Результаты прочностных расчетов. Исходя из результатов расчета, приняв в качестве наиболее тяжелого режима нагружения ходового привода преодоление эскарпа, исходным значением для расчета напряжений в элементах конструкции силового привода колес будем считать крутящий момент величиной 23 893 Н·м. Этот момент нагружает привод 3-й оси сочлененной машины и превышает аналогичную величину момента на жесткорамной машине на 18 %. Контрольный проверочный расчет напряжений в силовом приводе проведен на примере карданного вала привода 3-го моста сочлененной машины с использованием типовой методики путем определения напряжений, действующих в крестовине и вилке карданного шарнира, а также в трубе и шлицевом сопряжении вала. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Таблица 6

Расчетные напряжения в элементах карданного вала в блокированном контуре привода мостов задней тележки сочлененной и жесткорамной машин

Параметр	Допустимое значение	Расчетное значение	
		Сочлененный самосвал	Жесткорамный самосвал
Крестовина			
Напряжение изгиба, МПа	250…300	123,56	104,31
Давление на смятие, МПа	70…80	83,37	70,38
Напряжение среза, МПа	75…100	76,90	64,92
Вилка			
Напряжение кручения, МПа	80…165	465,33	382,82
Напряжение изгиба, МПа	50…80	105,24	88,84
Вал			
Угол закручивания, град/м. длины вала	3…9	3,63	3,09
Напряжение кручения в опасном сечении, МПа	100...300	3,41	2,89
Напряжение на смятие рабочих поверхностей, МПа	120	62,85	53,06
Эксплуатационная угловая скорость, $с^1$	699,80	115,41	228,78

Из данных табл. 6 следует, что максимальная величина расчетных напряжений в унифицированных элементах карданного вала привода 3-го моста шарнирно-сочлененного автосамосвала по всем позициям превышает

аналогичные значения у жесткорамной машины на 17…22 %. При этом у крестовины и вала все эти значения находятся в пределах допустимых напряжений. Напряжения кручения в опасном сечении и смятия рабочих поверхностей у вилки карданного шарнира превышают допустимые соответственно в 2,8 и 1,3 раза. Аналогичная картина наблюдается и у жесткорамной машины. Учитывая установленные обстоятельства на обеих машинах необходимо избегать применения бездифференциального привода мостов задней тележки, либо усиливать вилку крестовины карданного шарнира.

Заключение. Проведенное исследование показало принципиальную возможность использования в конструкции трансмиссии сочлененной машины элементов силового привода колес, унифицированных с жесткорамным аналогом, находящемся в серийном производстве. При этом возникновение напряжений, превышающих предельно допустимые, имеет место в одних и тех же конструктивных элементах как у сочлененной, так и у жесткорамной машины, и требует специальной конструктивной проработки.

Список литературы

1. Graeme Scott Wood The of articulated dump trucks on haul roads. Department of civil and environmental engineering. University of Edinburgh. 1994. 364 p.

2. Обзор рынка самосвалов на шарнирно-сочлененной раме в России // Отчет исследовательской группы ООО «ИГ Инфомайн». 2-е изд. М, 2014. 129 с.

3. Кравченко В.А. Специализированный подвижной состав. Курс лекций. Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2008. 216 с.

4. Обухов И.С., Баженов Е.Е. Транспортные средства с шарнирно-сочлененной конструкцией рамы // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. №12-1 (31). С.76-77.

5. Анализ эффективности применения шарнирно-сочлененных автосамосвалов при разработке месторождений с малыми запасами / И.Н. Сандригайло, С.А. Арефьев, Х.С. Мойсиев [и др.] // Известия Уральского государственного горного университета. 2015. № 2 (38). С. 23-27.

6. Полещук С.В. Внедорожные шарнирно-сочлененные самосвалы АМКОДОР // Грузовик. 2013. № 12. С.2-10.

7. Концептуальная оценка возможности создания отечественного сочлененного автосамосвала для использования по всем видам дорог и местности / В.Н. Добромиров, К.И, Фомин, У.Н. Мейке, И.В. Арифуллин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 2 (65). С. 18-25.

8. Добромиров В.Н. Автомобили двойного назначения. Основы теории специальных свойств. М: М.П. Глобал-концепт, 2000. 225 с.

9. Чистов М.П. Исследование сопротивления качению при движении полноприводного автомобиля по деформируемым грунтам: дис. … канд. техн. наук. М., 1971. 136 с.

10. Добромиров В.Н., Фомин К.И., Мейке У.Н. Модель взаимодействия эластичного колеса с деформируемой опорной поверхностью грунтовой дорожной насыпи // Технический журнал Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. 2024. № 7. С. 8-13.

Добромиров Виктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор, viktor.dobromirov@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

Мейке Ульяна Николаевна, канд. техн. наук, ассистент, ulyana.meike@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

Фомин Кирилл Игоревич, аспирант, fominkirill96@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

ASSESSMENT OF LOAD OF UNIFIED ELEMENTS OF THE DRIVE DRIVE OF RIGID FRAMES AND ARTICULATED DUM TRUCKS

V.N. Dobromirov, U.N. Meike, K.I. Fomin

The domestic road construction industry is experiencing a shortage of heavy-duty articulated dump trucks. A solution to this problem is proposed by creating a domestic sample as part of a highly unified family of dump trucks based on commercially available rigid frame models. At the same time, there is a need for a comparative computational assessment of the load of the unified transmission elements in the basic rigid frame and in the articulated machines being created. The article presents mathematical models developed by the authors that ensure such calculations, and the results of calculations confirming the fundamental possibility of implementing the authors proposal.

Key words: construction dump trucks-earth trucks, articulated layout, blocked drive of drive axles, loads in the drive, unification.

Dobromirov Viktor Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, viktor.dobromirov@mail.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

Meike Ulyana Nikolaevna, candidate of technical sciences, assistant, ulyana.meike@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

Fomin Kirill Igorevich, postgraduate, fominkirill96@mail.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

УДК 69.002.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-659-670

МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА НАДЕЖНОСТЬ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

А.В. Зазыкин, С.В. Репин, К.А. Головин, Н.А. Масленников, Г.Н. Белик

Рассмотрен механизм влияния на надежность условий эксплуатации транспортно-технологических машин, описываемых величиной затрат на обеспечение работоспособности машин и экономического ущерба от внезапных отказов в зависимости от уровня ответственности работ, выполняемых машинами. Показано, что от уровня ответственности работ, характеризуемого величиной возможного ущерба от внезапного отказа, зависит оптимальный уровень надежности машин.
Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательских работ в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») в 2024 году.
Ключевые слова: транспортно-технологические машины, эксплуатация, надежность, затраты, ущерб.

Введение. Надежность является самым востребованным потребительским свойством транспортно-технологических машин (ТТМ) строительства [1]. Именно надежностью технических систем (ТС), в том числе и ТТМ, определяется их эффективность и безопасность [2, 3]. Обеспечению надежности ТС посвящены исследования многих ученых [3, 4, 5], целенаправленные действия государственных институтов, выраженные в разработке систем ГОСТов по надежности [6, 7] и качеству [8], создании системы сертификации продукции и услуг [9, 10] и системы обеспечения надежности на всех стадиях жизненного цикла машин [3, 11, 12].

В последние двадцать лет активно разрабатываются так называемые надежно-ориентированные системы обслуживания [6, 7, 13] и эксплуатации ТС [14]. Задача исследований данной направленности – разработка научных положений и мероприятий на достижение уровня надежности, оптимального для определенных условий использования машин. С точки зрения критичности отказов рассматриваются два направления – обеспечение безопасности и экономической эффективности. Уровень безопасности регламентируется нормативными документами, определяющими вероятность отказов и их критичность в зависимости от класса безопасности ТС. В этой сфере диапазон научных исследований в направлении, указанном в названии статьи, гораздо уже, чем в сфере экономической эффективности, в которой, как ни странно, отсутствует достаточно полная с нашей точки зрения научно обоснованная методика практического определения оптимального уровня надежности (ОУН) ТС в зависимости от характера их использования.

В работах авторов статьи [1, 3, 15-19] изложен подход к достижению ОУН, но он не доведен до уровня практически применимой методики. На устранение данного пробела в научных исследованиях и направлена настоящая статья.

Понятие оптимального уровня надежности. Принцип достижения ОУН наглядно показан в монографии Эдельмана В.И. [5] (рис. 1) и заключается в нахождении минимума суммы затрат на обеспечение надежности ТС и величины возможного ущерба от недостаточной надежности. Описание механизма влияния величины затрат и ущерба на надежность ТС и представляет основную задачу настоящей статьи.

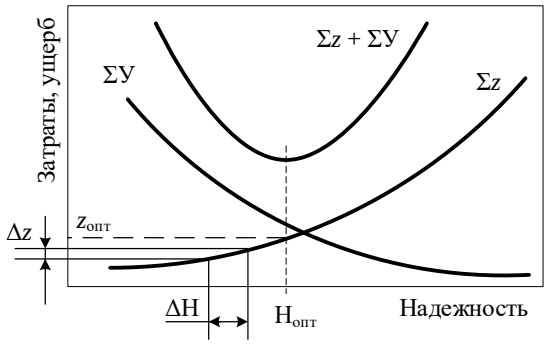


***Рис. 1. Процесс определения экономически целесообразного (оптимального)* $H_{опт}$ *уровня надежности: z – затраты на повышение уровня надежности; У – ущерб от недостаточного уровня надежности; Δz – приращение затрат на повышение надежности на величину* ΔН**

С возрастом надежность ТС снижается, что проявляется в ряде известных признаков старения машин [3], из которых по наибольшему влиянию на затраты и ущерб выделим следующие:

– повышается количество внезапных отказов, именно внезапных, вследствие которых срывается производственный процесс, что и приводит к ущербу от простоя машин, причем величина ущерба пропорциональна времени простоя;

– устранение последствий внезапных отказов приводит к дополнительным затратам на уменьшение ущерба (например, привлечение дополнительных средств для сокращения времени простоя);

– по мере старения машин растут затраты на их эксплуатацию, иными словами, на обеспечение их надежности, поэтому оптимальный уровень надежности для машин разного возраста тоже будет различным;

– снижение надежности машин описывается рядом показателей, причем один из наиболее важных – коэффициент готовности (*К*г) как раз и характеризует продолжительность простоев техники в неплановых ремонтах (НР), возникающих вследствие внезапных отказов.

Динамика показателей надежности машин в функции срока службы. Годовые величины ущерба от простоя машин и затрат на их эксплуатацию связаны с показателями надежности. Установлено [3], что снижение коэффициента готовности в зависимости от срока службы t ТТМ описывается экспоненциальным уравнением с показателем β_t (показатель снижения годовой наработки машин), равным 0,01…0,06:

$$K\text{г}(t) = \exp(-\beta_t \cdot t), \quad (1)$$

а время пребывания машины в работоспособном состоянии изменяется пропорционально *К*г:

$$T_{\text{РР}}(t) = T_{\text{РР}}(0) \cdot K\text{г}(t), \quad (2)$$

где $T_{\text{РР}}(0)$ – годовая наработка новой машины (с нулевым сроком службы), рассчитываемая согласно МДС 12-13.2003 [20].

Время простоев в НР (время пребывания в неработоспособном состоянии по причине внезапных отказов) составит

$$T_{\text{РНН}}(t) = T_{\text{РР}}(0) - T_{\text{РР}}(t). \quad (3)$$

Количество серьезных внезапных отказов, при которых для восстановления работоспособности машины требуется прибытие передвижной мастерской на объект или транспортирование отказавшей машины на базу для ремонта, рассчитывается по наработке на отказ $T_{\text{от}}(t)$, зависящей от условий применения и вида самой машины:

$$T_{\text{от}}(t) = T_{\text{от}}(1) \cdot \exp(-\beta_{\text{от}} \cdot t), \quad (4)$$

где $T_{\text{от}}(1)$ – среднестатистическая наработка на отказ в первый год эксплуатации машин данного вида в определенных условиях, час; $\beta_{\text{от}}$ – среднестатистический показатель снижения наработки на отказ с возрастом машин.
Тогда количество неплановых ремонтов, вызванных внезапными отказами, составит

$$\text{НР}(t) = T_{\text{РНН}}(t) / T_{\text{от}}(t). \quad (5)$$

Динамика затрат на эксплуатацию машин. Затраты на эксплуатацию машин возрастают с интенсивностью 2…4 % год [3]. Рост затрат происходит в основном по причине возникновения внезапных отказов. Эти затраты удобно представить в виде себестоимости машино-часа $C_{\text{мч}}$, умноженные на количество часов работы в году $T_{\text{РР}}$ (в терминологии теории надежности – время пребывания машины в работоспособном состоянии, изменение в функции срока службы приведено ниже):

$$Z(t) = T_{\text{РР}}(t) C_{\text{мч}}(t), \quad (6)$$

$$Z(t) = Z(0) \cdot \exp(\beta_z \cdot t), \quad (7)$$

где β_z – показатель старения машины по затратам.

На рис. 2 представлена калькуляция себестоимости машино-часа экскаватора ЕК-270 с учетом действубщих цен на август 2024 года, выподлненная по МДС 81-3.99 [21].

1	2	3	4
Наименование статей затрат	**Расчетные показатели, р./маш.**		**% от Смч**
	$z_{\text{пост}}$	**$z_{\text{пер}}$**	
Амортизационные отчисления, страховка, налоги	720	—	33,6
Затраты на ремонт и техническое обслуживание	—	352	16,5
Оплата труда машиниста	—	333	15,6
Затраты на дизельное топливо (по среднему за смену)	—	529	24,7
Затраты на смазочные материалы	—	53	2,5
Затраты на гидравлическую жидкость	—	53	2,5
Затраты на перебазировку	—	100	4,7
Сумма	**720**	**1420**	66,4
Итого $C_{\text{мч}}$	**2140**		**100,0**

Рис. 2. Калькуляция себестоимости машино-часа экскаватора ЕК-270

Для удобства анализа составляющие затрат сгруппированы по двум видам затрат: условно-постоянные $z_{\text{пост}}$, не зависящие от количества отработанных машино-часов (они же издержки владения, включающие помимо амортизации страховку, налоги, затраты на хранение и пр.); переменные $z_{\text{пер}}$ или эксплуатационные затраты, величина которых пропорциональна отработанному времени (составляют примерно 2/3 от $C_{\text{мч}}$ – 66,4 %).

Представив динамику составляющих затрат (руб./час) в функции срока службы *t* можно определить оптимальный срок службы машин по критерию минимума общих затрат $z_{\text{о}}(t)$ на машино-час:

$$z_{\text{о}}(t) = z_{\text{пост}}(t) + z_{\text{пер}}(t) = \frac{1{,}1C_{\text{м}} - C_{\text{л}}}{\sum_t T_{\text{РР}}(t)} + z_{\text{пер}}(1) \cdot \exp(\beta_z \cdot t), \quad (8)$$

где $C_{\text{м}}$ – рыночная цена новой машины (может быть и не новой, в случае покупки машины со сроком службы); 1,1 – коэффициент, учитывающий дополнительные расходы на владение машиной (страховка, налоги, хранение); $C_{\text{л}}$ – ликвидационная цена машины (может быть и рыночная цена продажи машины со сроком службы, в случае такого варианта ликвидации машины, как продажа); $z_{\text{пер}}(1)$ – величина переменной составляющей затрат в первый год эксплуатации машины (см. рис. 2).

Ущерб. Величина ущерба У(t) за определенный период времени (в рассматриваемом варианте расчета – год) определяется количеством внезапных отказов и связанных с ними неплановых ремонтов НР, средней продолжительностью единичного простоя Тпр (час) и величиной часового ущерба от простоя:

$$У(t) = у \cdot Тпр \cdot НР(t), \quad (9)$$

где у – величина часового ущерба от простоя, руб./час; t – возраст машины, лет.

Ущерб имеет многочисленные проявления [5], но в данной статье будем рассматривать лишь величину часового ущерба от простоя отказавшей машины и техники, связанной с ней в технологическом цикле и поэтому тоже остановленной, рассчитываемого по значению недополученной выручки ΔВ (руб./час) и затрат на использование смежной техники Zит (руб./час):

$$у = \Delta В + \sum_{i=1}^{n} Zит_i . \quad (10)$$

где n – количество единиц техники, связанных в технологическом цикле с отказавшей машиной.

Величина недополученной выручки связана с характером использования машины. Если машина сдается в аренду, то часовая выручка равна цене машино-часа, по которой сдается арендатору. Если используется собственная машина предприятия, то выручка зависит от цены продукции, вырабатываемой за один машино-час. В обоих случаях в точном расчете выручки выручка связана с надежностью машины. Так, более новая машина, а значит и более надежная, сдается в аренду по более высокой цене машино-часа. А производительность новой машины выше, чем возрастной, по причине влияния параметрической надежности.

Затраты на восстановление работоспособности машины. Отказ ведущей машины в технологической цепи имеет наиболее серьезные экономические последствия. Поэтому предпринимаются действия по скорейшему восстановлению ее работоспособности. В зависимости от серьезности поломки возможны варианты восстановления работоспособности машины – силами машиниста или передвижной ремонтной мастерской. В более сложном случае отказа производится замена машины на работоспособную.

Для случая использования арендованных машин затраты несет в основном арендодатель. Если же работы выполняются на собственной технике предприятия, то при замене машины выстраивается длинная цепочка затрат: на доставку работоспособной, а зачастую и специально содержащейся резервной машины на объект; на доставку отказавшей машины на базу и ее на ремонт; на содержание резервной машины.

Данный вид затрат настолько велик для предприятия-владельца техники, что некоторые исследователи рассматривают его как составляющую экономического ущерба. Поэтому в качестве ведущей машины в технологической цепи следует применять самую надежную технику, учитывая также, что затраты растут пропорционально количеству внезапных отказов (расчетная формула для количества внезапных отказов в функции возраста машины приведена ниже).

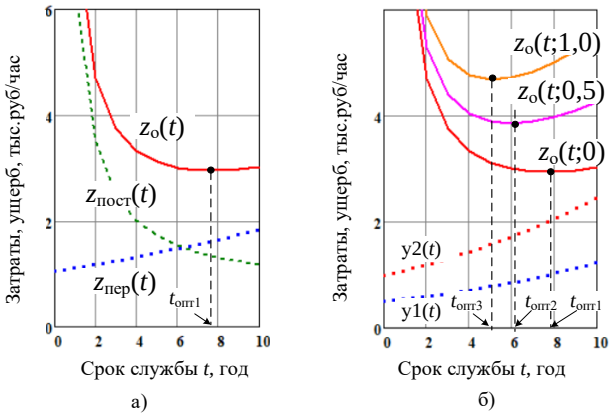


Рис. 3. Результаты моделирования в MathCAD влияния постоянных и переменных составляющих затрат (а) и ущерба (б) на оптимальный срок службы машины на примере экскаватора ЕК-270

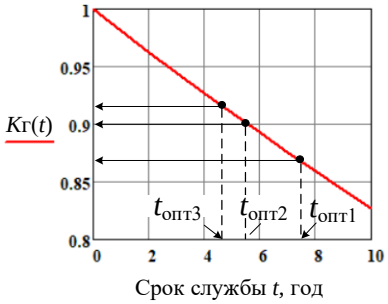


Рис. 4. Оптимальное значение надежности, соответствующее оптимальным срокам службы и выраженное в коэффициенте готовности (диаграмма получена путем моделирования в MathCAD)

Влияние ущерба на оптимальный срок службы машин. Для оценки влияния ущерба на оптимальный срок службы машин следует представить ущерб распределенным на машино-час в функции срока службы

$$у(t) = \frac{У(t)}{T_{РР}(t)}, \quad (11)$$

а затем просуммировать с общими затратами $z_o(t)$ на машино-час, рассчитываемыми по формуле (8).

На рис. 3 представлены результаты моделирования в MathCAD влияния ущерба на оптимальный срок службы машины на примере экскаватора ЕК-270 на основе действующих на август 2024 года цен. Начальное значение у1 равно 0,5 тыс. руб./час, у2 – 1,0 тыс. руб./час. Обозначение $z_o(t; 1{,}0)$ показывает изменение общих затрат в функции срока службы t при величине среднечасового ущерба в размере 1,0 тыс. руб. Значения оптимальных сроков службы $t_{опт1}$, $t_{опт2}$ и $t_{опт3}$ равны соответственно 8, 6 и 5 лет. Чем больше величина ущерба, тем меньше оптимальный срок службы. Оптимальное значение надежности, соответствующее указанным срокам службы и выраженное в коэффициенте готовности, может быть рассчитано по формуле (1) (рис 4). В формуле использовано среднестатистическое значение показателя β_t для экскаватора ЕК-270 равное 0,019.

Таким образом, решена задача, поставленная в начале статьи, а именно, описан вариант оценки влияния эксплуатационных затрат и –ущерба от внезапного отказа на надежность ТС и определения оптимального уровня надежности в зависимости от величины ущерба.

Список литературы

1. Анализ рынка дорожно-строительных машин в России и эволюция потребительских качеств этих машин / С.Е. Максимов, С.В. Репин, А.В. Зазыкин, В.Е. Чечуев // Строительные и дорожные машины. 2019. № 7. С. 3-12.

2. Надёжность и эффективность в технике. Справочник в 10 томах. Т. 1. Методология. Организация. Терминология. / Под ред. А.И. Рембезы. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

3. Надежность и эффективность эксплуатации транспортно-технологических машин / С.В. Репин, С.А. Евтюков, А.В. Зазыкин, К.В. Рулис. СПб: Издательский дом «Петрополис», 2017. 404 с.

4. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем: Учебник для вузов. М.: Магистр-Пресс. 2005. 536 с.

5. Эдельман В.И. Надежность технических систем: экономическая оценка. М.: Экономика. 1988. 151 с.

6. ГОСТ Р 27.001-2009 Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2010. II. 10 с.

7. ГОСТ Р 27.606-2013. Надежность в технике Управление надежностью Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность. М.: Стандартинформ, 2014. IV. 35 с.

8. ГОСТ ИСО 9000:2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2015. IV. 49 с.

9. Грифф М.И. Качество, эффективность и основы сертификации машин и услуг. М.: АСВ, 2004. 488 с.

10. Зорин В.А., Грифф М.И., Рубайлов А.В. Основы сертификации транспортных и технологических машин, услуг технического сервиса и систем качества: учеб. пособие. М.: Моск. автомоб.-дор. ин-т (гос. техн. ун-т), 2004. 223 с.

11. Анцев В.Ю., Витчук П.В. Обеспечение долговечности лифтовых канатоведущих шкивов // Тяжелое машиностроение. 2013. № 11-12. С. 37-41.

12. Прогнозирование долговечности крановых ходовых колес с учетом отклонений крановых путей от проектного положения / П.В. Витчук, А.А. Шубин, В.Ю. Анцев, К.Ю. Крылов // Подъемно-транспортное дело. 2019. № 5 (98). С. 7-12.

13. Антоненко И.Н. Некоторые заблуждения и мифы о надежностно-ориентированном техническом обслуживании // Энергоэксперт. 2019. № 3. С. 71-75.

14. Ефремов Л.В. Проблемы управления надежностно-ориентированной технической эксплуатацией машин. СПб: Арт-Xpress, 2015. 206 с.

15. Евстафьев И.Я., Репин С. В., Рулис К.В. Программный комплекс «TRIM» для управления основными фондами предприятия // Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства»: в 2 ч. СПб.: СПбГАСУ, 2006. Ч. 2. С. 155-60.

16. Исследование процессов автоматизации управления эксплуатацией строительной техники и разработка их информационного обеспечения: отчет о НИР / СПбГАСУ; рук. С.В. Репин. СПб.: СПбГАСУ, 2007. 54 с.

17. Исследование процессов формирования технической эксплуатации, ориентированной на надежность транспортно-технологических машин: отчет о НИР / СПбГАСУ; рук. А.В. Зазыкин. СПб.: СПбГАСУ, 2019. 140 с.

18. Автоматизированное управление эксплуатацией строительных машин / С.В. Репин, К.В. Рулис, А.В. Зазыкин [и др.] // Механизация строительства. 2008. № 4. С. 14-17.

19. Репин С.В., Антоненко И.Н. Управление сроками службы машин в автоматизированной системе // Грузовое и пассажирское автохозяйство. 2008. № 4. С. 48-57.

20. Механизация строительства. Годовые режимы работы строительных машин. МДС 12-13.2003. М.: ЦНИИОМТП. 2003. 28 с.

21. Методические указания по разработке сметных норм и расценок на эксплуатацию строительных машин и автотранспортных средств. МДС 81-3.99. М.: Госстрой России. 1999. 32 с.

Зазыкин Андрей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, a.v.zazykin@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

Репин Сергей Васильевич, д-р техн. наук, профессор, repinserge@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

Головин Константин Александрович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, kagolovin@inbox.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Масленников Никита Александрович, канд. техн. наук, доцент, заведующй кафедрой, masl-nikita@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

Белик Георгий Николаевич, аспирант, georgiybelik@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

METHOD OF ASSESSING THE INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON THE RELIABILITY OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES

A.V. Zazykin, S.V. Repin, K.A. Golovin, N.A. Maslennikov, G.N. Belik

The article considers the mechanism of influence on the reliability of the operating conditions of transport and technological machines, described by the amount of costs to ensure the operability of machines and economic damage from sudden failures depending on the level of responsibility of the work performed by the machines. It is shown that the optimal level of machine reliability depends on the level of responsibility of the work, characterized by the amount of possible damage from a sudden failure.

The article is published based on the results of research work within the framework of the grant competition for the implementation of research work by scientific and pedagogical workers of St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering») in 2024.

Key words: transport and technological machines, operation, reliability, costs, damage.

Zazykin Andrey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, a.v.zazykin@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

Repin Sergey Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, repinserge@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

Golovin Konstantin Alexandrovich, doctor of technical sciences, docent, head of department, kagolovin@inbox.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Maslennikov Nikita Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, maslnikita@yandex.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

Belik Georgy Nikolaevich, postgraduate, georgiybelik@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

УДК 625.7/8
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-663-664

ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПЛОТНЯЮЩИХ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

В.В. Михеев, И.А. Угрюмов, Б.А. Раздобарин

В статье рассматривается проблема формирования общего подхода к проектированию высокопроизводительной дорожно-строительной уплотняющей техники на примере катков для уплотнения грунтов основания дорог. Выявлены пути и обосновываются методики дальнейшего развития конструкций дорожных катков, их рабочих органов и агрегатов на основе рассмотрения актуальных практических и теоретических результатов в этой области. Определены комплексные критерии выбора конструктивных особенностей и совокупности режимных параметров работы существующих катков для уплотнения грунтов с наибольшей эффективностью. Рассмотрение процесса уплотнения грунтовых сред катками с точки зрения его энергоэффективности позволило указать характеристики перспективных конструкций катков, их рабочих органов и режимов их эксплуатации, обеспечивающих повышение производительности их работы. Сформулированы перспективные направления для разработки энергоэффективных уплотняющих машин.

Ключевые слова: уплотнение, дорожные катки, энергоэффективность, производительность, режимные параметры, динамическое воздействие, рабочие органы, грунтовые среды.

Уплотнение дорожно-строительных материалов – важнейшая операция в дорожном строительстве, обеспечивающая прочностные и эксплуатационные характеристики автодороги. Особое место при этом занимает уплотнение грунтов основания автодороги. Грунты, как правило естественного залегания, в основном, пески, супеси, суглинки и глины, используются в этом качестве этого наиболее широко. Несмотря на низкую долю в общей стоимости материалов, от качественного уплотнения грунтов в огромной степени зависит прочность и износостойкость устраиваемых на основании дороги ее верхних слоев.

Уплотнение грунтов основания дороги дорожными катками подробно регламентировано нормативными документами [1, 2]. Однако, диапазон значений конструктивных параметров уплотняющей машины, величин, определяющих силовое воздействие на поверхность грунтового слоя, параметров самого слоя достаточно широк и режимные параметры работы катка определяются весьма приблизительно.

Это, несомненно, обусловлено широким спектром механических свойств грунта, определяемых его составом и структурой, которые достаточно сильно могут различаться в рамках одного типа материала [3]. В особенности это касается деформативных свойств грунта, прежде всего упругости, определяемой модулем Юнга [4] и являющуюся ведущей в сопротивлении внешней силе. Коэффициент (степень) уплотнения определяет состояние грунта в за-

данный момент времени. Его измерение зачастую требует применения весьма трудоемких методов и в реальном времени вряд ли возможно [5]. В реальных условиях уточнение для выбранного комплекса «грунт-каток» параметров работы осуществляется в рамках пробной укатки, требующей затрат времени и ресурсов [1]. Тем не менее, активно ведется поиск методов иных, чем гранулометрических или динамических методов, определения текущего состояни уплотняемого грунта, являющихся ключевыми для построения систем автоматизированного контроля работы машины [6].

Тем самым задача организации подбора наиболее эффективного с точки зрения затрат ресурсов режима процесса уплотнения остается актуальной.

Способы повышения производительности дорожной уплотняющей техники главным образом основываются на более точном учете особенностей механизмов накопления пластической деформации слое грунта. Одним из ключевых экспериментальных методов при этом является анализ движения рабочего органа катка при вибрационном уплотнении [7]. Выявление характеристик взаимодействия и отклика слоя на динамическое воздействие при состояниях материала, изменяющихся при деформировании, позволяет определить требуемые значения параметров воздействия, обеспечивающие высокую интенсивность необратимого деформирования без разрушения.

Эта задача может решаться также переходом к более интенсивным, ударным типам воздействия, в частности, к ударному трамбованию, для которого, как может быть показано, не обязательно переходить к принципиально иному типу машины [8]. Отрыв рабочего органа катка от поверхности грунтового слоя, с последующим ударным трамбующим усилием, может происходить и при изменении характеристик грунтового слоя с упрочнением. В этом случае переход к трамбованию может как играть позитивную роль для уплотнения, так и препятствовать эффективному пластическому деформированию слоя.

Другим способом повысить производительность уплотняющих машин выступает адаптирование характеристик воздействия к изменяющимся характеристикам грунта и других дорожно-строительных материалов. Это достигается, в частности, использованием катков с рабочими органами с возможностью деформирования [9]. Время пребывания грунта основания (легко обобщается на материалы верхних слоев дороги) под нагрузкой может быть увеличено использованием многовальцовых катков [10].

Вибровозбудители (генераторы периодического воздействия), являющиеся узлами рабочих органов вибрационных и трамбующих машин также могут стать причиной потерь мощности. Это происходит в первую очередь ввиду затрат на генерацию усилия, не вызывающего уплотняющего давления на грунт, в результате чего могут страдать узлы катка и оператор машины. Одной из возможностей устранить это выступает использование генераторов периодического воздействия высокой степени направленности, в качестве примера которых может быть приведена конструкция [11].

Все указанные способы повышения производительности работы катков вписываются в рамки единого подхода, рассматривающего процесс уплотнения с точки зрения энергоэффективности.

Коэффициент уплотнения, соответствующий состоянию грунта, определяется как

$$k_y = \frac{\rho(t)}{\rho_{ном}}, \tag{1}$$

где $\rho(t)$ – плотность материала в момент времени t; $\rho_{ном}$ – стандартная или номинальная плотность, регулируемая нормативами (например, [1, 2]) для каждого типа грунта.

В качестве эксплуатационного показателя интенсивности уплотнения грунта катком традиционно рассматривается объемная производительность

$$V_{прив} = \frac{3600 v h_{нач}(B-b)}{n}, \frac{\text{м}^3}{\text{час}}, \tag{2}$$

где v – рабочая скорость движения катка, м/с; $h_{нач}$ – начальня толщина слоя, м; B – ширина захватки (как правило принимаемая для катков равной ширине вальца), м; b – величина перекрытия (принимаемая около $0.25 \cdot B$), м; n – число проходов катка, требуемое для достижения номинальной плотности грунта.

Однако, рассматривая уплотнение как процесс передачи энергии уплотнителя (рабочего органа катка) материалу слоя таким образом, чтобы ее максимальная доля была затрачена на его пластическое деформирования, двух указанных величин оказывается недостаточно. Требования повышения интенсивности уплотнения делают необходимым привлечение для его рассмотрения более детальных методов. В работе [12] было показано, что, снизив долю теряемой мощности при работе катка и обеспечив уплотняющим воздействием состояние слоя, в котором его материал наиболее восприимчив к деформированию, появляется возможность определять характеристики уплотняющего воздействия комплексным образом, основываясь на параметрах слоя и конструктивных характеристиках катка.

Общей векторной целевой функцией, описывающей энергоэффективность режимов работы вибрационных катков, учитывающей производительность, энергоемкость и энергоэффективность для использования в оптимизационной задаче подбора комплекса режимных параметров уплотняющей машины, может быть выбрана:

$$\begin{pmatrix} k_y \to 1 \\ \dfrac{\Delta E_{пласт}}{\Delta E_{полн}} \to \max \\ \dfrac{\Delta k_y}{\Delta E_{пласт}} \to \max \end{pmatrix}, \tag{3}$$

где Δk_y – обеспеченное приращение коэффициента уплотнения; $\Delta E_{пласт} / \Delta E_{полн}$ – доля полезной работы уплотнителя в затраченной на уплотнение энергии; $\Delta k_y / \Delta E_{пласт}$ – относительная эффективность затрат полезной работы уплотнителя.

Для более часто встречающегося случая использования нескольких катков показатель производительности можно скорректировать, перейдя к производительности, приведенной к возможностям катка, способного уплотнить рассматриваемый слой до номинальной плотности

$$V_{прив} = 3600vh_{нач}(B-b)\frac{k_{укон}-k_{унач}}{1-k_{унач}}, \frac{м^3}{час}, \quad (4)$$

где $k_{укон}$ – величина коэффициента уплотнения по итогам прохода; $k_{унач}$ – исходная величина коэффициента уплотнения слоя.

Величина (3) учитывает, как возможность использование нескольких катков для уплотнения, так и начальное состояние грунта.

Рассмотрение качества использования мощности уплотняющей машины (катка) требует привлечения дополнительных критериев. В качестве одного из них может быть предложен показатель энергоемкости (обратной) уплотнения грунтового слоя катком

$$П_{прив} = \frac{3600vh_{нач}(B-b)}{Wn}, \frac{м^3}{кДж}, \quad (5)$$

где W – полная мощность катка при работе, кВт.

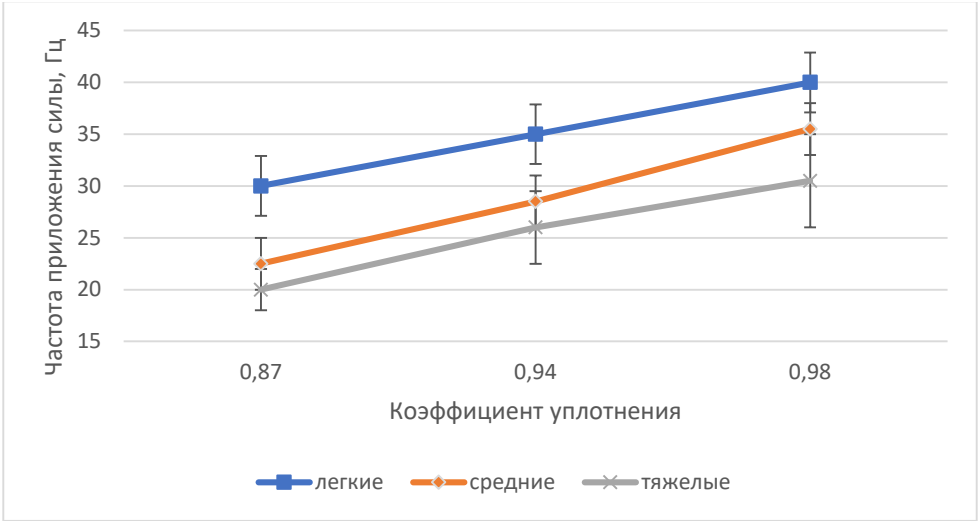


Рис. 1. Диапазоны частоты вибрации при уплотнении супесей (начальный $k_y = 0{,}87-0{,}92$ ***, промежуточный*** $k_y = 0{,}92-0{,}98$ ***, завершающий*** $k_y = 0{,}98-1{,}0$ ***)***

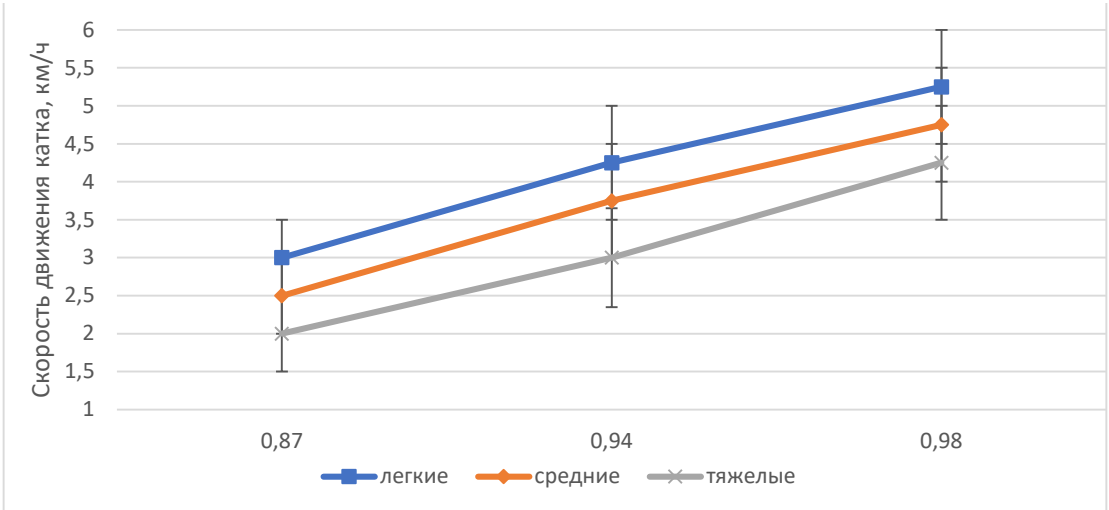


Рис. 2. Диапазоны скорости катков при уплотнении супесей (начальный $k_y = 0{,}87-0{,}92$ ***, промежуточный*** $k_y = 0{,}92-0{,}98$ ***, завершающий*** $k_y = 0{,}98-1{,}0$ ***)***

Аналогично формуле (4) можно ввести обратную приведенную энергоемкость реального катка на проходе

$$П_{зприв} = \frac{3600Vh_{нач}(B-b)}{W}\frac{k_{укко}-k_{унна}}{1-k_{унна}}, \frac{м^3}{кДж}, \quad (6)$$

обобщив ее на случай нескольких проходов (требуемых для уплотнения до номинальной плотности)

$$П_{зприв} = \frac{3600 h_{нач}(B-b)}{\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{V_i}\right)\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{W_i}{n}\right)} \frac{k_{укко} - k_{унна}}{1-k_{унна}}, \frac{м^3}{кДж}, \quad (7)$$

где W_i – полная мощность катка i-м проходе, кВт; V_i – скорость поступательного движения кактка на i-м проходе.

Эти величины (6), (7) имеют смысл приращения коэффициента уплотнения на единицу затрачиваемой мощности катка, в случае одного подхода (6) или при работе катка на нескольких проходах, в том числе и с различающейся поступательной скоростью движения, что полностью согласуясь с положениями обоснованного в работе подхода.

В качестве примера использования предложенного подхода можно привести результат выбора совокупности эксплуатационных параметров гладковальцовых катков при уплотнении супесей и суглинков при реализации оптимизационной задачи (1). На рис. 1-4 представлены зависимости частоты приложения уплотняющей силы и скоростного параметра работы катка, являющиеся основными эксплуатационными параметрами работы катков в соответствии с нормативными документами и уточняющие их требования [2]. Рассматривались типовые значения толщины слоя, соответствующие эксплуатационным характеристикам катков при оптимальных значениях влажности грунта.

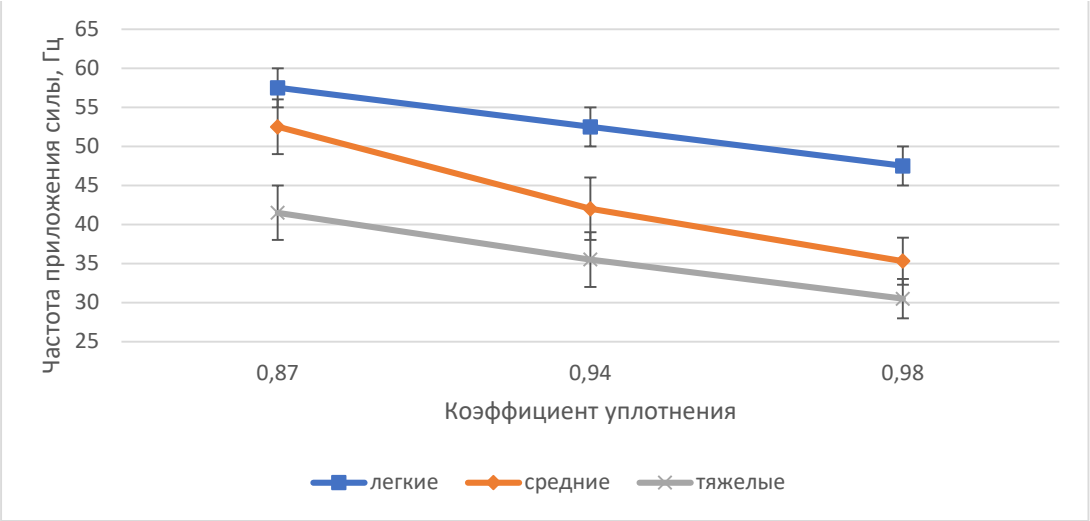


Рис. 3. Диапазоны частоты вибрации при уплотнении суглинков (начальный $k_y = 0{,}87-0{,}92$ ***, промежуточный*** $k_y = 0{,}92-0{,}98$ ***, завершающий*** $k_y = 0{,}98-1{,}0$ ***)***

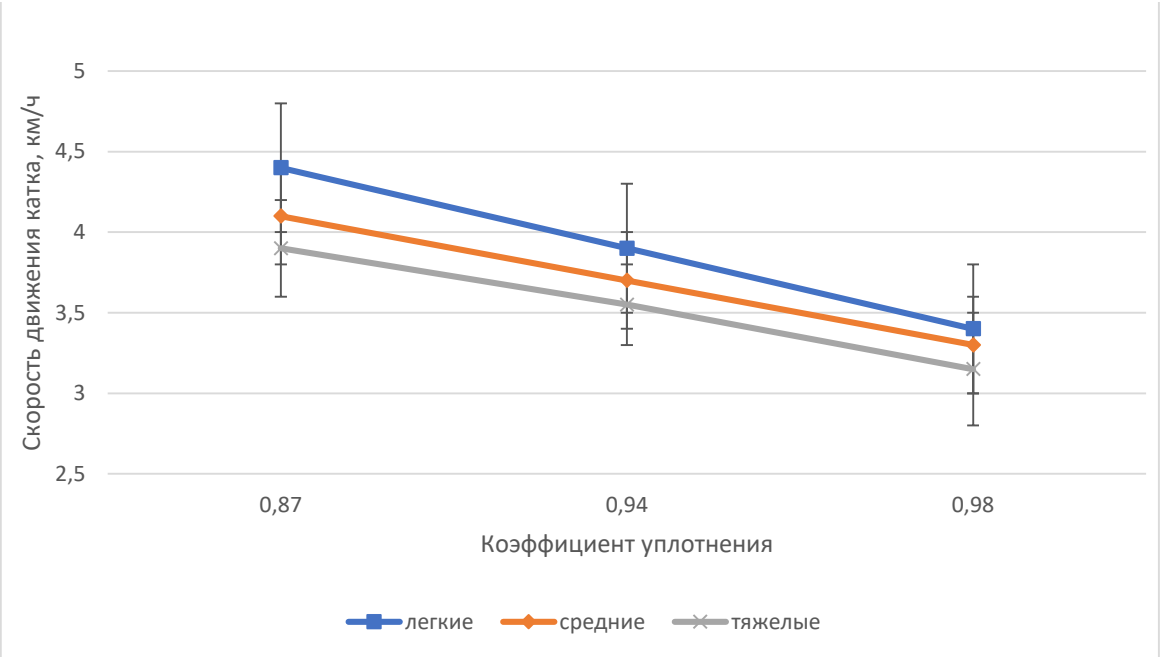


Рис. 4. Диапазоны скорости катков при уплотнении суглинков (начальный $k_y = 0{,}87-0{,}92$ ***, промежуточный*** $k_y = 0{,}92-0{,}98$ ***, завершающий*** $k_y = 0{,}98-1{,}0$ ***)***

Следует также указать, что основная сложность реализации предложенной схемы состоит в требовании наличия достоверных данных о гранулометрическом и физико-химическом составе, а также комплексе механических характеристик грунта.

Обзор и анализ методик повышения эффективности конструкций дорожных катков для уплотнения грунтовых сред основания автодорог позволил сделать вывод, о том, что оно должно происходить комплексным образом с учетом особенностей режима силового воздействия рабочего органа на грунт и механизма его реализации, изменения свойств грунта при пластическом деформировании и характеристик рабочего органа. Основными способами дальнейшей реализации комплексного принципа повышения эффективности выступают:

1. Снижение потерь при реализации динамических режимов работы катка, в том числе и с использованием высоконаправленных генераторов периодической силы.

2. Снижение потерь энергии в грунте адекватным выбором режимных параметров работы катка с учетом характеристик рабочего органа, возможно с нетривиальными деформационными свойствами том числе и деформируемого.

3. Вариативность и адаптирование силового воздействия, обеспечиваемые конструкцией уплотняющей машины.

4. Вариативность и регулирование уплотняющего воздействия изменением режимных параметров, в том числе и средствами автоматического регулирования.

Исследование, представленное в работе, проводилось в рамках гранта Российского научного фонда и Министерства промышленности и научно-технического развития Омской области по теме № 23-29-10010 «Разработка дорожных катков для повышения эффективности транспортного строительства с учетом региональных условий Омской области».

Список литературы

1. СНиП 3.06.03-85. Строительные нормы и правила. Автомобильные дороги. М.: ЦНТП Госстроя СССР, 1986. 112 с.

2. СТО НОСТРОЙ 2.25.23-2011. Автомобильные дороги. Строительство земляного полотна автомобильных дорог. Часть 1. Механизация земляных работ при сооружении земляного полотна автомобильных дорог. М: МАДИ-плюс, Изд-во БСТ, 2012. 73 с.

3. Горячев М.Г. Оценка ожидаемых значений модулей упругости глинистых грунтов при строительстве земляного полотна автомобильных дорог // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2020. № 2 (24). С. 6.

4. О рассогласованиях в государственных стандартах на требования к пескам и предложения по назначению их расчётных характеристик при проектировании дорожных одежд / М.Г. Горячев, С.В. Лугов, Е.В. Каленова [и др.] // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2021. № 3 (29). С. 1.

5. Илюхин А.В., Борисов С.В., Лазукин Я.В. Основные методы контроля степени уплотнения грунтов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №1 (35). С. 1.

6. Применение и преимущества инновационного устройства контроля качества уплотнения грунта / С.В. Савельев, Г.Г. Бурый, И.К. Потеряев, А.С. Белодед // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 1. С. 187-192.

7. Analysis of center of gravity roller drum soil stiffness on compacted layered earthwork / A. Neff, M. McAdams, J. Wang, M. Mooney // Canadian Geotechnical Journal. 2015. V. 52. № 4. P. 459-468. DOI: https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0074.

8. Тюремнов И.С. Анализ технических характеристик различных типов ударно-вибрационных грунтоуплотняющих машин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 706-716. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-6-706-716.

9. Савельев С.В., Михеев В.В., Сачук Ю.С. Эффективность использования вибрации в пневмошинных дорожных катках при устройстве автомобильных дорог // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. № 12. С. 640-644. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-12-640-641.

10. Каток прицепной трехвальцовый / В.А. Нилов, В.А. Жулай, В.Л. Тюнин, Е.В. Федоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 8. С. 559-561. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-8-559-560.

11. Mikheyev V.V. New type of vibration generator with vibratory force oriented in preferred direction // Journal of Vibration Engineering & Technologies. 2018. V. 6. P. 149–154. DOI: 10.1007/s42417-018-0025-4.

12. Михеев В.В. Развитие теории проектирования дорожных катков для энергоэффективного уплотнения грунтов: дисс. … д-ра техн. наук Омск, 2022. 386 с.

Михеев Виталий Викторович, д-р техн. наук, профессор, vvm125@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет, г.н.с. НИО НИУ Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,

Угрюмов Игорь Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, декан, 92817@mail.ru, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,

Раздобарин Борис Алексеевич, аспирант, boris_trd@mail.ru, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

PRINCIPLES OF EFFICIENCY ENHANCEMENT FOR THE PERFORMANCE OF ROAD-BUILDING COMPACTION MACHINES

V.V. Mikheyev, I.A. Ugryumov, B.A. Razdobarin

Article considers the problem of generalized approach to design of high-performance road-building compacting machines. Road rollers for soil compaction were chosen as an illustrative example of suggested approach. Existing results in the theory and practice of road roller construction and soil compaction were considered as a foundation for methods of further mastering and enhancement of designs of road rollers as well as construction of their work tools and work patterns. As a result of analysis specific complex criteria were obtained for correct choice of effective construction and work patterns of existing soil compacting road rollers. Energy efficiency of soil compaction appeared to be the key feature to reveal the promising design of road rollers, work tools of road rollers and highly productive work patterns. Perspectives for further development of effective road building machines were pointed out as well.

Key words: compaction, road rollers, energy efficiency, productivity, regime parameters, work pattern, dynamic action, work tools, soils.

Mikheyev Vitaly Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, vvm125@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk state technical university, chief researcher, scientific department Siberian state automobile and highway university,

Ugryumov Igor Anatolievich, candidate of technical sciences, docent, dean, 92817@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian state automobile and highway university,

Razdobarin Boris Alexeevich, postgraduate, boris_trd@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian state automobile and highway university

УДК 624.92(083.75)
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-668-669

ПОВЫШЕНИЕ КОМФОРТА ПАССАЖИРОВ ПРИ СНИЖЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЛИФТОВ

М.А. Степанов, Б.А. Кайтуков, П.О. Андреева

В статье рассматриваются возможности снижения динамических нагрузок гасителями колебаний и повышения комфорта пассажиров лифтов. Важными факторами, влияющими на комфорт пассажиров и повышение надежности работы лифта, являются снижение уровня вибрации и шума. Установлено, что на действующих лифтах, на нижних и верхних этажах зданий, возникает значительная вибрация, которая отрицательно влияет на здоровье пассажиров. Снижение ее уровня возможно с помощью динамических гасителей колебаний. Предложен гаситель, который разместили на раме лебедки привода, позволив существенно снижать высокочастотные колебания. Экспериментально полученные данные представлены в виде графиков перемещений и скоростей с гасителями и без них. Сравнительная оценка полученных огибающих амплитуд колебаний кабины лифта утвердили нас в правильности такого подхода. Гаситель предложенной конструкции решает проблему снижения динамических нагрузок, а это позволяет повысить комфорт пассажиров в кабине лифта.

Ключевые слова: комфорт, пассажир, динамическая нагрузка, модель, лифт, привод лебедки, гаситель.

В настоящее время, в лифтах различной грузоподъемности, с механическим приводом лебедки и частотным регулированием при возрастании динамических нагрузок, снижается комфорт пассажиров в кабине. Эти негативные факторы приводят к нарушению работы лифта, повышается износ элементов и ухудшается взаимодействие каната со шкивом. Эксплуатация лифтов в такой ситуации с течением времени, влечет повышение динамических нагрузок и в результате снижается комфорт пассажиров [1-3].

Актуальность статьи обусловлена возрастающим интересом к повышению комфорта пассажиров при снижении высокочастотных колебаний в кабине лифта. Эксплуатационные исследования уровня вибрации лифтов показали, что при работе на разных высотах 25 этажных зданий, возникает существенная вибрация [4]. Нормативные значения вибрационных характеристик и шума приведены в стандартах [5]. Одним из способов снижения вибрации является установка гасителя колебаний [6]. Однако, необходимо учитывать тот факт, что лифт является сложной динамической моделью, а это требует, при решении уравнений движения разработать более простую модель [7]. Упрощая многомассовую упругую динамическую систему, необходимо учитывать, что для уменьшения вредного воздействия вибрации и шума на пассажиров следует обеспечить более низкие их уровни что повышает конкурентоспособность лифтов. Для решения задачи предложили двухмассовую динамическую модель [8]. Предложенная модель позволила свести сложную систему с многими степенями свободы к системе с одной степенью свободы. Любая механическая модель лифта может быть сведена к некоторой многомассовой системе, которая должна включать маховые массы и жесткости упругих элементов, соединяющих эти массы. Анализ различных моделей позволил предложить более рациональную схему, где в качестве составной части включили кабину, кроме этого включили массу лебедки, массу других элементов, жесткость четырех резиновых опор.

Для лифта грузоподъемностью $Q = 630$ кг и скоростью $v = 1{,}6$ м/с был разработан пассивный динамический рычажный гаситель колебаний, который является беззазорным рычагом второго рода и снабжен механизмом с упругим элементом в виде полукольца. Такая конструкция гасителя обеспечивает постоянное передаточное отношение при небольшой собственной массе. В результате исследований и по конструктивным соображениям гаситель разместили на раме лебедки, вблизи схода канатов со шкива, при этом он закрепляется в

распор на раме, между неподвижным подрамником и подвижной рамой. Эксплуатационные исследования позволили утвердиться в правильности выбора такой конструкции динамического гасителя, его массы жесткости. Для лифтов различной грузоподъемности установили коэффициенты динамичности и уточнили массы и жесткости гасителей. Важной задачей при снижении высокочастотных колебаний является определение оптимального места расположения гасителя на раме лебедки и их числа. Решая задачу рационального размещения гасителя на раме, воспользовались методом динамики с применением матричного аппарата линейной алгебры, что позволило для лифта грузоподъемности $Q = 630$ кг и скоростью $v = 1{,}6$ м/с установить место крепления. Наиболее рациональным оказалась точка номер один под шкивом схода канатов (рис. 2).

Значительное снижение высокочастотных колебаний можно добиться при рациональном размещении необходимого количества гасителей. Решение предполагает аналитический подход, что в последующем получило подтверждение в результате экспериментов и расчетов с гасителями на лифтах грузоподъемностью $Q = 630$ кг и скоростью $v = 1{,}6$ м/с.

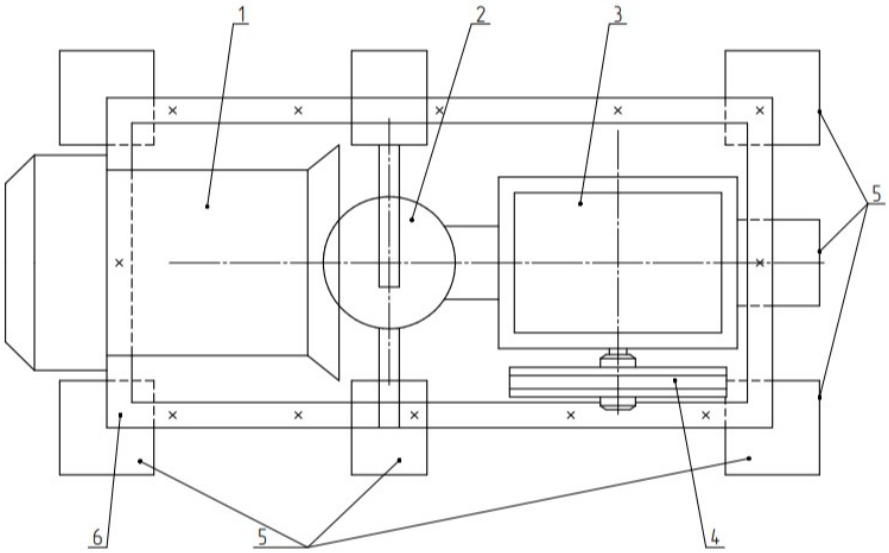


Рис. 1. Схема размещения элементов привода на раме лебедки лифта грузоподъемностью 630 кг

На рис. 1 представлена схема размещения элементов привода на раме лебедки лифта грузоподъемностью $Q = 630$ кг и скоростью $v = 1{,}6$ м/с, где: 1 – электродвигатель; 2 – тормоз; 3 – редуктор; 4 – шкив; 5 – опоры; 6 – рама. Крестиками на раме обозначены возможные точки крепления динамических гасителей.

Эксплуатационные исследования этих лифтов показали, что замеры уровня вибрации кабины без гасителей оказались близкими, что говорит о незначительном разбросе колебаний со стороны лебедки. Аналитический подход позволил установить коэффициент динамичности, учитывающий влияние вертикальных высокочастотных колебаний на кабину лифта грузоподъемностью $Q = 630$ кг и скоростью $v = 1{,}6$ м/с. Коэффициент динамичности λ определяется по зависимости $\lambda = \left(\frac{P}{w}\right)^2$, где $P = \frac{C_0}{m}$, m, C_0 – масса и жесткость резиновых опор рамы лебедки соответственно, w – частота колебаний. Разработанная двухмассовая динамическая модель позволила определить и решить уравнения движения, и далее перейти к амплитудам усилий в упругих элементах. Установлено, что рама лебедки этого лифта хорошо реагирует на продольные колебания кабины и противовеса. Адаптивный метод, реализуемый в конечно-элементарной постановке, позволил решить задачу снижения колебаний. Записали уравнения в амплитудах перемещений масс с использованием матрицы динамической жесткости системы. Далее рассмотрели деформируемую систему сосредоточенными массами и вынужденными колебаниями, которые порождались нагрузками на элементах лифта, произвольные по виду и месту расположения. Для гасителя определили массы и жесткости упругих элементов, которые обеспечивали снижение колебаний до нормативных. Такая задача была обратной сложному динамическому расчету, определяя параметры гасителей. В качественном смысле регулятором выступали гасители, которые были ориентированы по направлениям движения масс системы, а в этом случае были динамические перемещения в точках крепления гасителей.

Следующий этап – это кинематический метод подбора масс и жесткостей гасителей. Рассмотрим систему с одномассовыми гасителями и воспользуемся кинемостатическим методом динамики с использованием матричного аппарата линейной алгебры. Тогда, уравнения вынужденных колебаний в амплитудах перемещений в расчетных узлах крепления гасителей запишем в виде [9, 10]:

$$\left[v^*\right] \cdot [Y] + [R_F] = 0, \tag{1}$$

где $[Y]$ – вектор амплитуд динамических перемещений расчетных точек системы и масс гасителей; $\left[v^*\right]$ – матрица динамической жесткости реакций по направлениям перемещений Y; $[R_F]$ – вектор амплитуд реакций, соответствующие перемещениям Y, от заданных воздействий.

Вектор $[Y]$ представляется в виде перемещений точек защищаемой системы, где располагаются массы, на которые вводятся ограничения по условиям регулирования в точках установки гасителей и наконец перемещения масс гасителей. Причем в системе уравнений (1) имеем три группы: уравнения, которые описывают амплитудное состояние системы, уравнения, которые относятся к местам установки гасителей, где требуется регулировать перемещения и уравнения, характеризующие состояния устанавливаемых гасителей. Для формирования матрицы жесткости целесообразно использовать вычислительные комплексы SCAD или ANSYS [11]. Матрица в реализуемой задаче для динамической жесткости системы имеет вид:

$$[v^*]=\begin{bmatrix}[v^*_{Y_S}]\\ [v^*_{Y_r}]\\ [v^*_{Y_d}]\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}[v^*_{Y_SY_S}] & [v_{Y_SY_r}] & [v_{Y_SY_d}]\\ [v_{Y_rY_S}] & [v^*_{Y_rY_r}] & [v_{Y_dY_r}]\\ [v_{Y_dY_S}] & [v_{Y_dY_r}] & [v^*_{Y_dY_d}]\end{bmatrix}, \quad (2)$$

где элементы главной диагонали матрицы $v^*_{ii}: v^*_{ii}=m_i\omega_F^2$, $(i=1,...,n_s+n_r)$; m_i – масса системы в точке с перемещением z_i; ω_F – частота внешнего воздействия.

Параметры масс и жестокости гасителей требуется подобрать так, чтобы выполнялись условия существенного снижения высокочастотных колебаний кабины лифта. Для определения основных неизвестных $[Y_S]$ необходимо использовать ограничения перемещений в местах установки гасителей и постановкой условий регулирования в систему уравнений (1). Тогда система (1) распадается на группы независимых систем уравнений, содержащих массы и жесткости гасителей. Для определения массы целесообразно задавать жесткость. В случае, если необходимо приравнять к нулю перемещения в точке крепления гасителя, взаимосвязь массы и жесткости будет:

$$B(C_{d,j})=1, \quad (3)$$

где j – номер гасителя (на рис. 2).

Согласно (3) имеем:

$$\frac{m_{d,j}\cdot\omega_F^2}{B(C_{d,j})}=C_{d,j}, \quad (4)$$

где $j=1,...,n$ – число гасителей в группе.

Зависимость $[Y]$ совпадает с формулой подбора рационального динамического рычажного гасителя колебаний. Параметр $B(C_{d,j})$ в (3) характеризует зависимость между массой и жесткостью гасителя при фиксированной частоте ω_F.

Рассмотрим схему, с предполагаемыми точками для размещения гасителей, лифта грузоподъемностью $Q=630$ кг и скоростью $v=1{,}6$ м/с (см. рис. 1). На рис. 2 с позиции № 1 по позицию № 12 указаны места крепления гасителей. Данная схема размещения позволяет, с учетом исходных данных, формировать матрицу жесткости. Для определения элементов матрицы упругой жесткости системы последовательно задавались $Y_i=1,(i=1,...,12)$, а для вычислений воспользовались ПКSCAD. Полученная матрица жесткости для лифта грузоподъемностью $Q=630$ кг и скоростью $v=1{,}6$ м/с позволила выбрать место крепления в точке 1 (рис. 2).

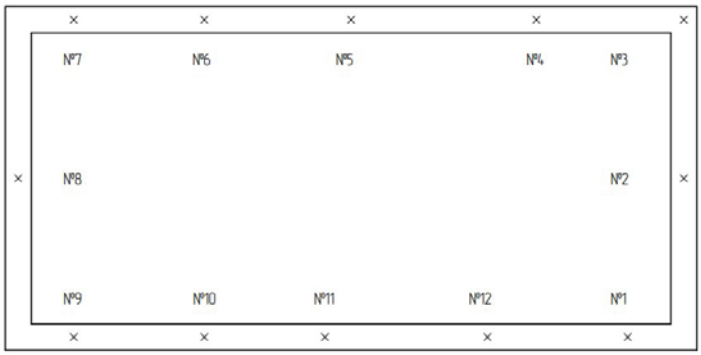


Рис. 2. Схема для построения матрицы жесткости с местами установки гасителей

Применение гасителей колебаний существенно снижает вертикальные высокочастотные колебания. Из расчетной модели из 12 точек наиболее рациональной для исходного лифта оказалась точка № 1. Иначе, предположение об установке гасителя у канатоведущего шкива наиболее рациональное решение, с полученными массами и жестокостью.

Далее необходимо экспериментально подтвердить, насколько рационально такое решение, когда один гаситель может решить исходную проблему. Для лифта, который мы выбрали в исходном примере, можно решить проблему одним динамическим гасителем. В данном случае масса установленного гасителя оказалась в 6,7 раза меньше массы лебедки, а колебания снизились в 5,6 раза. На некоторых лифтах, с целью снижения трех форм собственных колебаний, установили по два гасителя, с меньшей массой, чем при установке одного гасителя. Рациональный выбор места установки двух гасителей позволил снизить до минимума вибрацию, при этом мы строго следили за суммарной рабочей массой.

На рис. 3 представлены графики огибающих амплитуд колебаний кабины лифта грузоподъемностью $Q = 630$ кг и скоростью $v = 1{,}6$ м/с с одним гасителем, где кривая 1 получена при проведении испытания без гасителя, а кривая 2 – при одном установленном гасителе [10, 12]. Для составления следовало экспериментально оценить перемещения и скорости с гасителями колебаний и без них.

Замеры перемещений (S) и скоростей (v) выполняли виброметром, ВК-5, в зависимости от этажа при работе лифта, в середине потолка кабины лифта.

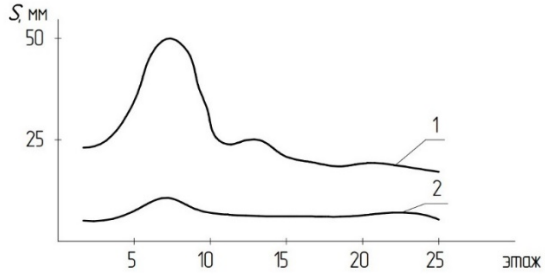


Рис. 3. Графики перемещений в зависимости от этажа

Амплитуды скоростей (v) в зависимости от этажа представлены на рис. 4, где кривая 1 без гасителя, а кривая 2 с установленным гасителем, для лифта грузоподъемностью $Q = 630$ кг и скоростью $v = 1{,}6$ м/с.

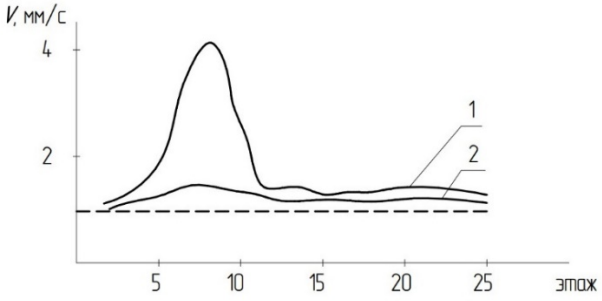


Рис. 4. Графики скорости в зависимости от этажа

Кривые амплитуд перемещений (S) и скоростей (v), рис. 3, 4 для наглядности включают сравнительные кривые 2 с установленным гасителем. Эти кривые получены при установке на раму одного гасителя, масса которого не превышали 0,08 % массы лебедки.

Сравнительная оценка показала, что ординаты перемещений снизились в 4,5 раза, а скоростей в 4,2 раза. При установке двух гасителей, масса каждого из них снизилась, а ординаты перемещений уменьшились в 5,4 раза и скоростей в 4,2 раза. Эксперимент с двумя гасителями позволил снизить колебания до нормативных значений для лифта грузоподъемностью $Q = 630$ кг и скоростью $v = 1{,}6$ м/с. Следует отметить, что максимальные ординаты (S, v) получены при подходе кабины лифта к 8 этажу 25 этажного здания.

В заключении можно утверждать, что предложенный метод решает исходную задачу. Аналитические и экспериментальные исследования лифтов с установленными гасителями на лифтах грузоподъемностью $Q = 630$ кг и скоростью $v = 1{,}6$ м/с утвердили нас в правильности выбора динамического пассивного рычажного гасителя колебаний. При установке одного гасителя ординаты перемещений (S) уменьшилась в среднем в 4,5 раза, а скоростей (v) в 4,2 раза, где масса его не превышала 0,08 % массы лебедки. Последующая конструктивная и технологическая проработка гасителя, при оптимальном подборе места крепления на раме, может существенно повысить комфорт в кабине и надежность работы лифта.

Список литературы

1. Шарапов Р.Р., Кайтуков Б.А., Степанов М.А. Некоторые вопросы динамики и надежности строительной техники // Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 7. С. 5-8.

2. Назарова М.К. Основы расчета лифтовых конструкций на динамические воздействия // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2019. № 8. С. 74-78.

3. Степанов М.А., Мечиев А.В. Повышение надежности лифта при нормальной эксплуатации // Научное обозрение. 2014. №7-1. С. 148-152.

4. Черкасов В.А., Кайтуков Б.А. Определение уровня высокочастотных колебаний кабины лифта // Механизация строительства. 2011. № 11. С. 14-17.

5. ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021. Вибрация. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния машин. Ч. 1. Общее руководство. М.: Российский институт стандартизации, 2022. IV. 32 с.

6. Коренев Б.Г., Резников Л.М. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения. М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 304 с.

7. Архангельский Г.Г., Овчинникова Ю.С. Исследование виброизоляции лебедки лифта методом компьютерного моделирования // Механизация строительства. 2010. № 8. С. 6-10.

8. Степанов М.А., Семенов А.Б., Андреева П.О. Некоторые вопросы снижения динамических нагрузок в лифтах // Строительные и дорожные машины. 2022. № 12. С. 54-56.

9. Бархаев С.Ю. Динамические уравнения ускоренного движения многоканатного подъемника (лифта) в пусковых режимах // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 181-186.

10. Степанов М.А., Кайтуков Б.А., Андреева П.О. Снижение высокочастотных колебаний кабины лифта // Системные технологии. 2023. № 3(48). С. 107-111.

11. Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова, С.Д. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. М.: ДМК Пресс. 2017. 210 с.

12. Степанов М.А., Кайтуков Б.А., Андреева П.О. Экспериментальное исследование динамических нагрузок лифтов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 20. С. 78-82.

Степанов Михаил Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, masmias@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Кайтуков Батраз Амурханович, канд. техн. наук, доцент, KaitukovBA@mgsu.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Андреева Полина Олеговна, аспирант, polina.andr.98@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

INCREASING PASSENGER COMFORT WHILE REDUCING DYNAMIC LOADS OF ELEVATORS

M.A. Stepanov, B.A. Kaitukov, P.O. Andreeva

The article considers the possibilities of reducing dynamic loads by vibration dampers and increasing the comfort of elevator passengers. Important factors affecting the comfort of passengers and improving the reliability of elevator operation are the reduction of vibration and noise. It is established that on operating elevators, on the lower and upper floors of buildings, there are significant vibrations that adversely affect the health of passengers. Reduction of their level is possible with the help of dynamic vibration dampers. The proposed damper, which was placed on the frame of the winch drive, allowed to significantly reduce high-frequency vibrations. Experimentally obtained data, presented in the form of graphs of displacements and velocities with and without dampers. The comparative estimation of the received envelopes of amplitudes of vibrations of an elevator cabin, have confirmed us in correctness of such approach. The damper of the proposed design solves the problem of dynamic loads reduction, and it allows to increase the comfort of passengers in the elevator cabin.

Key words: comfort, passenger, dynamic load, model, elevator, winch drive, damper.

Stepanov Mikhail Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, skelvi@mgsu.ru , Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering,

Kaitukov Batraz Amurkhanovich, candidate of technical sciences, docent, KaitukovBA@mgsu.ru , Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering,

Andreeva Polina Olegovna, postgraduate, polina.andr.98@mail.ru, Russia, Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering

УДК 539.422.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-672-673

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К РАБОЧЕМУ ПРОЦЕССУ РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Д.В. Фурманов, Т.А. Краснобаев

В статье предлагается комбинированный подход для описания рабочего процесса оборудования статического действия для разрушения железобетонных изделий. Отмечается, что проектирование таких машин на сегодняшний день затруднено из-за недостаточной теоретической базы по определению их рациональных параметров. Предлагается гипотеза, основанная на феноменологических теориях прочности и механике хрупкого разрушения, которая должна позволить полноценно описать процесс разрушения бетона под действием рабочих органов машин. Разработана конечно-элементная модель для оценки напряжённо-деформированного состояния бетона с точки зрения предлагаемой гипотезы и с помощью неё произведён расчет в программном комплексе ANSYS Workbench. По результатам расчета были получены теоретические зависимости разрушающего усилия для бетонных образцов различной прочности и сформулированы направления по дальнейшей работе.

Ключевые слова: железобетонные изделия, оборудование статического действия, феноменологические теории прочности, механика разрушения, хрупкое разрушение, конечно-элементный анализ.

Здания и сооружения из железобетонных изделий (ЖБИ) уже давно стали неотъемлемой частью нашей жизни. Железобетон известен как надёжный композитный материал [1], с высокой несущей способностью и относительно невысокими затратами на изготовление, эксплуатацию и утилизацию.

Прочность и безопасность конструкций из ЖБИ проверяется инженерами-проектировщиками задолго до начала строительства по научно обоснованным и проверенным методикам. Когда дело доходит до операций, связанных с разрушением ЖБИ, будь то реконструкция отдельных частей здания либо его полная утилизация, становится ясно, что необходимо наличие специального оборудования способного эффективно и надёжно справляться с разрушением различных типов ЖБИ.

Для реализации операций по разрушению широкое применение нашли машины и оборудование статического действия. Условно его можно разделить на специальное и универсальное. Под специальным понимают узконаправленное оборудование, предназначенное для разрушения конкретных типов ЖБИ, например, оборудование для срезания оголовков железобетонных свай. Универсальное же оборудование, будь оно либо навесным (бетоноломы, гидроножницы, мультипроцессоры) либо ручным (гидравлические клещи, гидроклин), способно разрушать большинство типов ЖБИ и применяется в широком диапазоне технологических операций.

Несмотря на высокий спрос и переполненность рынка оборудования для разрушения ЖБИ его проектирование до сих пор затруднено. Очень часто машины и оборудование такого типа становятся предметом интуитивного проектирования с минимальным научным обоснованием их конструкции, параметров режущих элементов и мощности. В этой связи оборудование, подобранное под конкретные задачи, используется нерационально. В виду больших запасов по разрушающему усилию, закладываемых на этапе проектирования, оборудование приобретает высокие габаритные размеры и массу, тем самым ограничивая его применение в стеснённых условиях и требуя наличие базовых машин повышенной грузоподъёмности на объектах проведения работ.

Рационально начинать обоснование параметров оборудования с объекта разрушения и его характеристик. Железобетон является многокомпонентным материалом и, по определению, представляет собой композит с направленным расположением арматурных стержней.

Механическое разрушение железобетона происходит путем разрушения его матрицы и отделения её разрушенных элементов от арматуры. Рабочий орган машины (зуб, резец) стремится проникнуть в матрицу, тем самым образуя в ней концентратор напряжений. Без детального понимания происходящих при этом физических процессов, невозможно предсказать усилие, необходимое для разрушения железобетона.

С точки зрения структурно-прочностных свойств удобнее всего рассматривать ЖБИ как систему, состоящую из бетонной матрицы и удерживающего её стального каркаса. При таком подходе можно анализировать бетон как объект разрушения, рассматривая его как гомогенную среду, поскольку на макроуровне наполнитель и связующее обладают примерно одинаковыми прочностными и деформационными свойствами.

Оценка напряженно-деформированного состояния бетона при различных типах нагружения зачастую проводится с применением феноменологических теорий прочности. В рамках такого подхода исследователи предлагают различные гипотезы прочности (например, работы [2-5]). Данные гипотезы представляют собой различные функции вида $F(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)=0$, которые являются аппроксимацией результатов различных экспериментов. Графически такая функция представляет собой некоторую предельную поверхность, расположенную в осях главных напряжений, внутри неё заключены безопасные напряжения. Выход суммарного вектора напряжений от прикладываемой нагрузки за границы такой поверхности означает мгновенное разрушение материала.

Применимость такого подхода для решения задач разрушения бетона рабочими органами машин ограничена, поскольку условие достижения критического значения напряжений будет зачастую выполнятся только непосредственно в зоне контакта рабочего органа с материалом. Описать дальнейшее разрушение материала в объёме с образованием мезотрещин и возможных магистральных трещин при таком подходе не представляется возможным, поскольку значения напряжений за пределами контактной зоны будут значительно ниже. Тем самым феноменологические теории прочности позволяют описать только первоначальное разрушение материала с зарождением трещин.

Описание дальнейшего разрушения материала в объёме возможно при помощи следствий из механики разрушения описанных в работе Алана Гриффитса [6]. Он показал, что процесс трещинообразования является энергетически выгодным, поскольку количество запасённой энергии в теле уменьшается. Предельное состояние материала по Гриффитсу определяется по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{р}} = \sqrt{\frac{E \cdot e}{\pi \cdot a_{\text{кр}}}}, \tag{1}$$

где E – модуль упругости, ГПа, e – удельная величина высвобождаемой энергии, Дж/м^2, $a_{\text{кр}}$ – критическая длина трещины, м.

Гриффитсом было доказано, что с увеличением длины трещины увеличивается и роль высвобождаемой энергии. Исходя из представленной формулы, начиная с некоторой «критической» длины, которая зависит от величины внешней нагрузки и свойств материала, трещина высвобождает больше энергии, чем потребляет. При условии, что тело всегда стремится уменьшить запасённую в нём энергию, трещина, длина которой больше критической, развивается безостановочно, разрушая образец материала.

В процессе дальнейших исследований Эгон Орован, в своей работе [7] уточнил теорию Гриффитса. Орован указал на то, что энергия пластического деформирования существенно влияет на образование новой поверхности трещины, причём она намного выше удельной поверхностной энергии тел. Данное свойство в последствии стало называться «вязкостью разрушения», а формула предельного состояния стала иметь вид:

$$\sigma_{\text{р}} = \sqrt{\frac{E \cdot G_{\text{с}}}{\pi \cdot a_{\text{кр}}}}, \tag{2}$$

где $G_{\text{с}}$ – вязкость разрушения, Дж/м^2.

Подходы, описанные выше, называют энергетическими, поскольку они основаны на законах сохранения энергии. Иногда на практике также применяют силовой подход, который основан на предложенном в работе Джона Ирвина [8] использовании коэффициента интенсивности хрупкого разрушения K_{C}. Данный коэффициент связывает силовые характеристики нагруженного тела с длиной трещины, если его величина не превышает критических значений, то трещина остаётся стабильной, не изменяя своих размеров:

$$K_C < K_{Скрит} . \quad (3)$$

Подход Ирвина является прямым следствием теории Орована, поэтому данное неравенство можно записать в следующем виде:

$$\sigma\sqrt{\pi \cdot a} < \sqrt{E \cdot G_c} . \quad (4)$$

Смысл данного неравенства состоит в том, что разрушение материала возникает тогда, когда в материале, содержащим трещину, длиной *a*, достигается критическое значение напряжения σ. При меньших значениях напряжений разрушения материала не происходит.

Подход механики разрушения в свою очередь также не лишен недостатков, он хорошо описывает закономерности развития трещин, но никак не указывает на механизм их зарождения, данная теория не работает без первоначального дефекта.

С учётом достоинств и недостатков каждого из подходов, можно прийти к выводу о том, что задача разрушения ЖБИ рабочими органами машин должна решаться комбинированно, с учётом феноменологических теорий прочности и механики хрупкого разрушения.

Необходимые и достаточные условия, для полного разрушения материала под действием режущего элемента сформулированы в виде следующей системы:

$$\begin{cases} \sigma_{экв} \geq \sigma_{вр}, \\ E_{упр} \geq G_c \cdot S, \end{cases} \quad (5)$$

где $\sigma_{экв}$ – значения напряжений, в месте контакта резца с материалом, Мпа; $\sigma_{вр}$ – предел прочности бетона, Мпа; $E_{упр}$ – энергия упругих деформаций, Дж; S – суммарная площадь образовавшихся магистральных трещин, м^2.

Первое неравенство говорит о том, что напряжения в зоне контакта должны превышать предел прочности бетона. Из второго неравенства следует, что энергии упругих деформаций, накопленной в объеме материала в результате воздействия режущего элемента, должно быть достаточно, чтобы преодолеть вязкость разрушения материала и образовать магистральные трещины с образованием новых поверхностей. Предполагается, что размеры будущих трещин известны.

Следует детально рассмотреть характер разрушения материала под воздействием рабочего органа с точки зрения предложенной гипотезы, поскольку в зависимости от порядка выполнения условий будет меняться и характер разрушения материала.

Возможные случаи поведения материала представлены на рис. 1. В случае, когда предельные значения энергии достигаются раньше, чем предельные значения напряжений, прикладываемое усилие вызовет высокую концентрацию энергии упругих деформаций, однако структурная прочность сохранится. При появлении первых поверхностных трещин произойдёт мгновенное разрушение материала с высвобождением накопленной энергии.

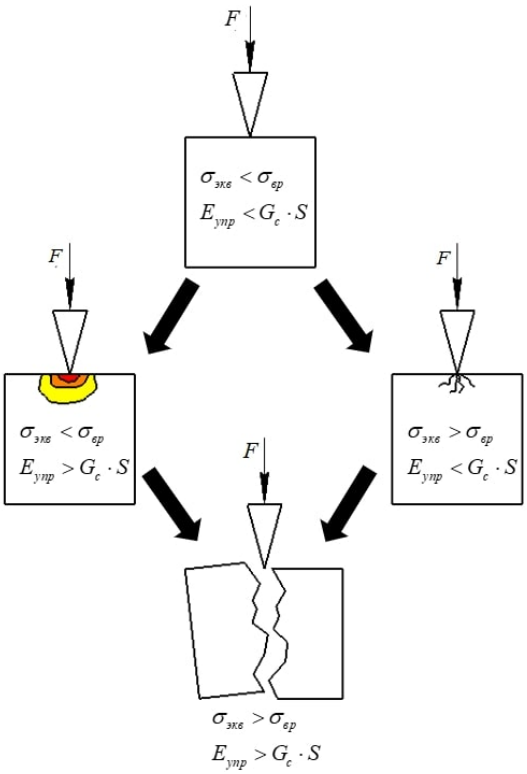


Рис. 1. Варианты разрушения бетона с точки зрения предлагаемой гипотезы

Для случая, когда предельные значения напряжений достигнуты раньше, чем предельные значения энергии, прикладываемое усилие вызывает поверхностные трещины без дальнейшего разрушения, из-за недостатка накопленной энергии. Дальнейшее разрушение материала будет возможно только с увеличением усилия и величины накопленной энергии.

Для изучения механизма формирования напряжений и энергии при воздействии рабочего органа на материал было проведено аналитическое исследование методом конечных элементов в программном комплексе Ansys Workbench.

На рис. 2 представлена расчетная схема, построенная во встроенном 3D редакторе SpaceClaim, где штампы различной формы вдавливаются в бетонные образцы.

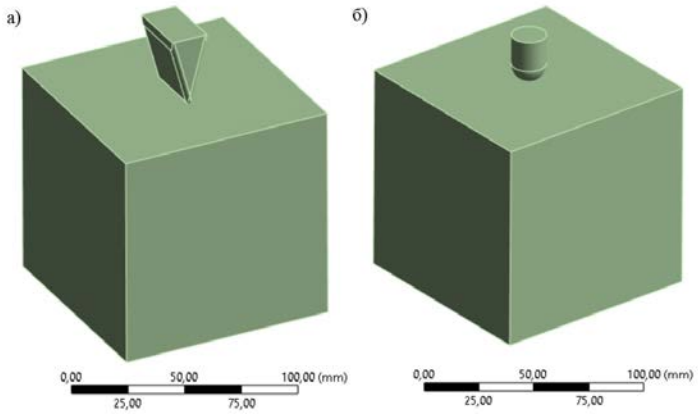


Рис. 2. Расчетная схема: а – вдавливание клинового штампа; б – вдавливание сферического штампа

В представленной расчетной схеме есть контактная пара без трения: штамп – образец (рис. 3, а) и два соединения: подвижное (рис. 3, б), отвечающее за перемещение штампа по оси X и неподвижное (рис. 3, в), фиксирующее нижнюю поверхность образца.

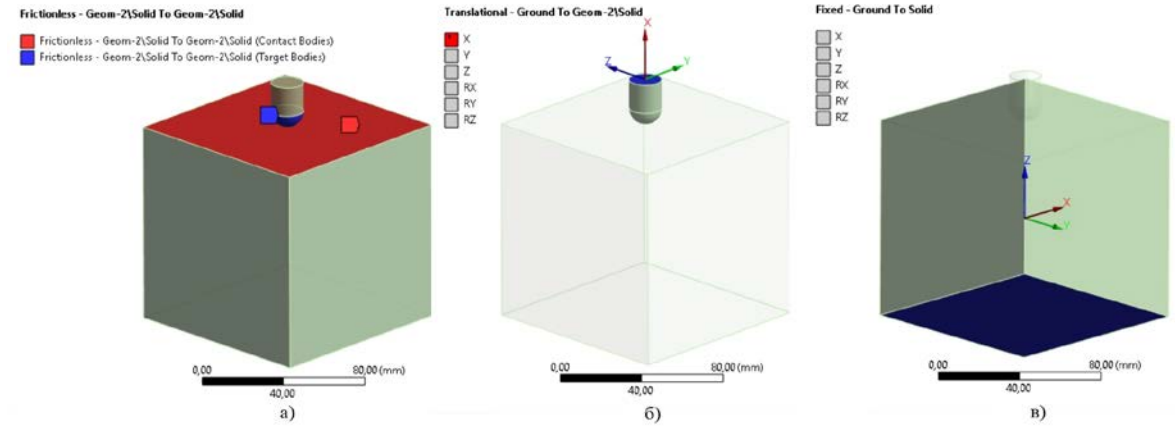


Рис. 3. Контакты и соединения в расчетной модели

Concrete

Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	30150 MPa
Poisson's Ratio	0,20000
Bulk Modulus	16750 MPa
Shear Modulus	12563 MPa
Menetrey-Willam	
Menetrey-Willam Base	
Uniaxial Compressive Strength	39,700 MPa
Uniaxial Tensile Strength	3,9700 MPa
Biaxial Compressive Strength	45,655 MPa
Dilatancy Angle	35,000 degree
Softening	
Active Table	Linear
Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength	0,00080000
Ultimate Effective Plastic Strain in Compression	0,0100000
Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening	0,50000
Residual Compressive Relative Stress	0,20000
Plastic Strain Limit in Tension	0,0100000
Residual Tensile Relative Stress	0,20000

Рис. 4. Задание констант материала для бетонного образца

Затем методом конечных элементов была выполнена дискретизация рассматриваемой модели. В данной задаче бетонный образец и штамп были разбиты 20-узловыми гексаэдрическими элементами с квадратичной функцией формы (SOLID 186). Далее задавались размер конечного элемента и его тип, сама сетка создавалась при помощи автоматического генератора ANSYS.

Размер элемента подбирался из условия согласования узлов на границе контакта образца со штампом. Также немаловажную роль играло отсутствие серьёзных расчетных мощностей, поскольку увеличение густоты сетки конечных элементов многократно увеличивало необходимый ресурс, потребляемый вычислительной машиной, и итоговое время решения.

В качестве расчетного варианта бетонного образца была принята модель Вильяма-Варнке, поскольку она позволяет хорошо отражать механическое поведение бетона, такое как различная прочность на растяжение и сжатие, нелинейное упрочнение, разупрочнение и дилатансию. Параметры задаются в меню «Engineering Data» (рис. 4). Прочность образцов задавалась в диапазоне $\sigma_{вр} = 10 \div 40$ МПа. Размеры образцов $100 \times 100 \times 100$ мм.

Штамп в свою очередь был задан абсолютно жестким через настройку «Stiffness behavior», чтобы рассматривать изменение свойств только непосредственно в образцах. Длина кромки клинового штампа равна 30 мм, угол заострения 30º, радиус сферического штампа равен 8 мм.

Решение задачи проводилось в решателе Static Structural, расчетный период времени 1 с с временным шагом 0,01 с. Для улучшения сходимости решения матрица жесткости в методе Ньютона-Рафсона была изменена на несимметричную. Штампу задавалось перемещение, после чего наблюдался отклик материала на внедрение в него соответствующего штампа.

По результатам расчета была создана база данных, включающая в себя компоненты тензоров напряжений и деформаций для каждого элемента расчетной системы на всем исследуемом временном интервале.

Для оценки предельной величины напряжений в месте контакта были построены графики зависимости величины напряжений от деформации (рис. 5) и в характерной пиковой точке оценивались значения усилия на вдавливание и значения величины энергии упругих деформаций.

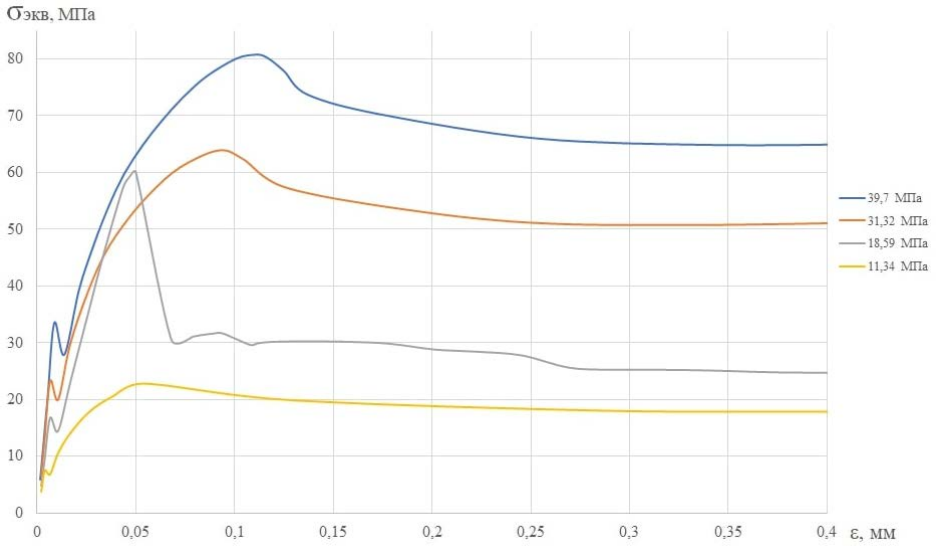


Рис. 5 Графики зависимости напряжений в зоне контакта от деформации образца для сферического штампа

Значение энергии упругих деформаций было получено при помощи инструмента обработки и представления результатов с использованием функции Strain Energy (рис. 6), она вычисляется для каждого конечного элемента путем интегрирования по объему, значения усилия были получены при помощи функции Joint Probe.

Для того чтобы оценить, насколько полученные значения усилия при расчёте соответствуют реально возможным необходимо в первую очередь знать вязкость разрушения образцов. Поскольку данная величина определяется зачастую только экспериментальным путём [9] в данной работе она будет рассчитана при помощи зависимостей, полученных по результатам экспериментальных исследовании, проведённых в других работах. Так в работе [10] предложена следующая зависимость для определения коэффициента интенсивности хрупкого разрушения:

$$K_{Ic}^{e} = 3{,}327\, f_c^{0{,}440} \cdot d_{max}^{0{,}145} \cdot \left(\frac{w}{c}\right)^{-0{,}438}, \qquad (6)$$

где K_{Ic}^{e} – коэффициент интенсивности хрупкого разрушения, f_c – предел прочности на одноосное сжатие, мПа; d_{max} – максимальный диаметр фракции щебня, мм; w/c – водоцементное соотношение.

Коэффициент интенсивности хрупкого разрушения, в свою очередь связан с вязкостью разрушения следующим соотношением:

$$G_c = \frac{K_{Ic}^2}{E}, \qquad (7)$$

где $M = \frac{q\eta_{гм}}{2\pi}\left(p - p_o\right)$ – начальный модуль упругости, ГПа, определяемый согласно ACI-318-19 [11], по формуле:

$$E = 4785\sqrt{f_c}\,. \tag{8}$$

После определения величины вязкости разрушения необходимая энергия упругих деформаций вычисляется по второму уравнению из системы (5).

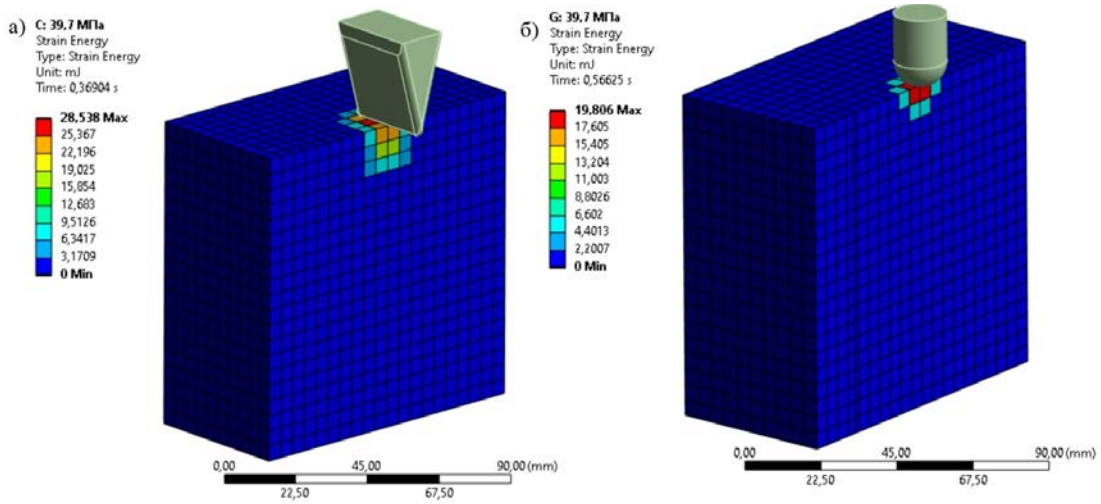


Рис. 6 Вычисление энергии упругих деформаций для клинового (а) и сферического (б) штампов

Далее определялся характер возможного разрушения согласно схеме, представленной на рис. 1, для случаев, когда предельные значения энергии достигались раньше, чем предельные значения напряжений, величина разрушающего усилия принималась равной значению из функции Joint Probe. В обратном случае, конечное значение разрушающего усилия находилось из следующего соотношения:

$$F_{\text{р}} = F_{\text{т}} \cdot \frac{E_{\text{упр.р}}}{E_{\text{упр.т}}}, \tag{9}$$

где $F_{\text{т}}$ – расчетное усилие, Н; $E_{\text{упр.р}}$ – требуемое количество энергии упругих деформаций, Дж; $E_{\text{упр.т}}$ – расчетное количество энергии упругих деформаций, Дж.

По результатам исследования был построен график зависимости усилия, необходимого для разрушения образца, от предела прочности образца (рис. 7).

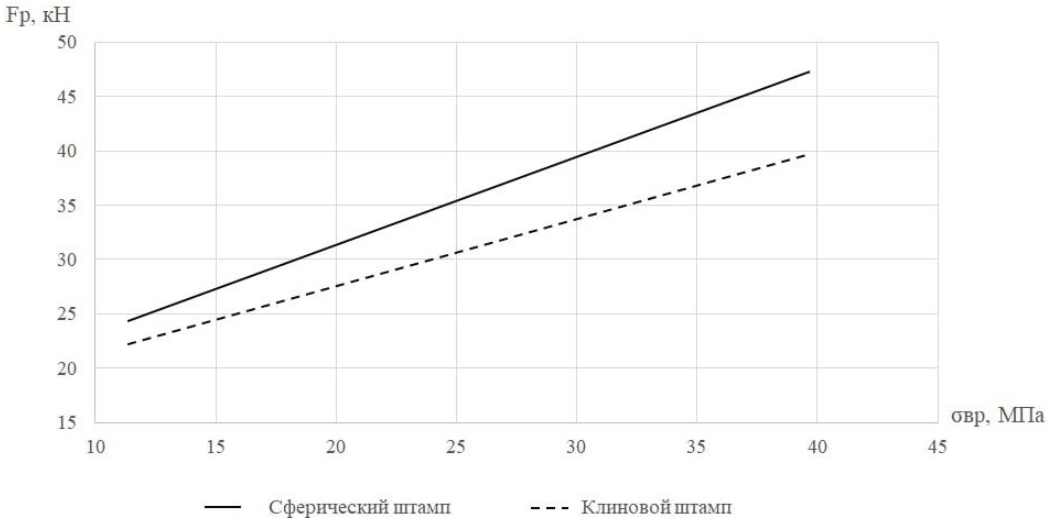


Рис. 7. Сводный график зависимостей разрушающего усилия от предела прочности бетонного образца

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Существующая теоретическая база по расчету напряжённо-деформированного состояния ЖБИ недостаточна для полноценного решения задач, связанных с разрушением ЖБИ рабочими органами машин.

2. Для наиболее точного описания процесса разрушения ЖБИ рабочими органами машин необходим комбинированный подход, который будет учитывать особенности поведения бетона с точки зрения механики разрушения и феноменологических теорий прочности.

3. Разработана конечно-элементная модель, позволяющая оценить поведение бетона под воздействием рабочих органов машин различной формы.

Для валидации предложенной модели необходимо оценить её точность проведя аналогичные экспериментальные исследования на различных образцах бетона. После чего возможна дальнейшая работа по её уточнению и дополнению, для наиболее точного описания рабочего процесса разрушения ЖБИ рабочими органами машин.

Список литературы

1. Королев П.А. Классификация композиционных материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 7. С. 469-473. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-469-470.

2. Coulomb C.A. Théorie des machines simples en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages. Nouvelle edition. Paris: Bachelier, 1821. 368 с.

3. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Т. 10. № 2. С. 157-165.

4. Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive models for the triaxial behavior of concrete // Proceedings of the International Assoc. for Bridge and Structural Engineering. 1975. Т. 19. С. 1-30.

5. Клованич С.Ф. Модель прочности и деформаций бетона и грунта при сложном напряженном состоянии // Строительные конструкции: Межвед. н.-т. сб. Киев: НИИСК, 2003. №. 59. С. 163-170.

6. Griffith A.A. The theory of rupture // Proceedings of the first International Congress for Applied Mechanics. Delft. 1924. С. 55-63.

7. Orowan E. Fracture and strength of solids // Reports on Progress in Physics. 1949. Т. 12. № 1. С. 185-232.

8. Irwin G.R. Analysis of stresses and straines near the end of crack traversing a plate // Journal of Applied Mechanics. 1957. Т. 24. № 3. С. 361-364.

9. ГОСТ 29167-2021. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 22 с.

10. Alyamaç K., Ince R. A prediction formula for fracture toughness of concrete // 7th International Fracture Conferences. 2005 Oct. 19-21. Kocaeli, Turkey, 2005. С. 213-222.

11. ACI-318-19, Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, 2019. 626 с.

Фурманов Денис Владимирович, канд. техн. наук, доцент, denis_furmanov@mail.ru, Россия, Ярославль, Ярославский государственный технический университет,

Краснобаев Тимофей Андреевич, аспирант, ассистент, tima_k.12@mail.ru, Россия, Ярославль, Ярославский государственный технический университет

COMBINED APPROACH TO THE WORK PROCESS OF REINFORCED CONCRETE DEMOLITION

D.V. Furmanov, T.A. Krasnobaev

The paper proposes a combined approach to describe the working process of static action equipment for the destruction of reinforced concrete products. It is noted that the design of such machines today is difficult due to insufficient theoretical basis for determining their rational parameters. A hypothesis based on phenomenological theories of strength and brittle fracture mechanics is proposed, which should allow to fully describe the process of concrete fracture under the action of machine working bodies. A finite element model was developed to evaluate the stress-strain state of concrete in terms of the proposed hypothesis, and with its help the calculation was performed in the ANSYS Workbench software package. According to the calculation results, theoretical dependences of the breaking force for concrete specimens of different strength were obtained and directions for further work were determined.

Key words: reinforced concrete products, static action equipment, phenomenological theories of strength, fracture mechanics, brittle fracture, finite element analysis.

Furmanov Denis Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, denis_furmanov@mail.ru, Russia, Yaroslavl, Yaroslavl State Technical University,

Krasnobaev Timofey Andreevich, postgraduate, assistant, tima_k.12@mail.ru, Russia, Yaroslavl, Yaroslavl State Technical University

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

УДК 004.852
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-679-680

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ФАЙЛОВЫХ СИСТЕМ

А.И. Олейник, Л.Э. Петросян

В данной статье будет проведен обзор нескольких алгоритмов кластеризации с графическими примерами их использования при оптимизации файловых систем. Из них будут рассмотрены такие алгоритмы как К-средних, Иерархический и DBSCAN, описаны их различия и достоинства в определенных ситуациях для выполнения поставленной задачи. Также приведен метод использования файлов в приведенных алгоритмах кластеризации.

Ключевые слова: машинное обучение, файловая система, кластеризация, алгоритм К-средних, иерархический алгоритм, DBSCAN алгоритм

При разработке системы сжатия файлов посредством кластеризации возникла необходимость различения между ее алгоритмами: какие из них имеют свои особенности, в каких ситуациях определенные алгоритмы будут более эффективными чем остальные. Для оптимизации работы приложения и для повышения его скорости необходимо учитывать данные различия.

Кластеризация – статистическая процедура, в ходе которой выполняется сбор данных, которые содержат информацию об определенной выборке объектов, после чего объекты упорядочиваются по тем или иным признакам в кластеры [1].

Сами алгоритмы могут отличаться разной скоростью выполнения выборок, возможностью настройки своих особых параметров для более точечного применения, а также количеством итераций или задействованных объектов, что повышает использование вычислительных ресурсов.

Алгоритм К-средних. К-средних – один из алгоритмов кластеризации, который выбирает некоторое количество случайных точек, называемых центрами кластеров, которые по мере работы алгоритма меняют свое местоположение для более четкого распределения элементов выборки [2]. Этот алгоритм, в отличие от остальных, позволяет вручную обозначить необходимое количество кластеров.

Для того, чтобы изучить скорость каждого из алгоритмов, необходимо понимать, как они реализуются. Математическая реализация алгоритма К-средних для примера того, как работает кластеризация:

1) Заранее задать необходимое количество создаваемых кластеров;

2) Создать выбранное количество центров в случайных местах, обозначить точность δ и номер итерации $l = 0$;

3) Рассчитать центры кластеров по формуле 1:

$$c^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{d} u_{ij} m_j}{\sum_{j=1}^{d} u_{ij}}, 1 \le i \le c, \tag{1}$$

где $C\ \{c^i\}$ – вектор кластеров; $M\ \{m_j\}$ – обучающее множество.

4) Обновить матрицу разбиения, минимизируя квадраты ошибок, пользуясь формулой 2:

$$u_{ij}^{(l)} = \begin{cases} 1 \text{ при } d\left(m_j, c_i^{(l)}\right) = \min\limits_{l \le k \le c} d(m_j, c_k^{(l)}) \\ 0 \text{ в остальных случаях} \end{cases}, \tag{2}$$

где $U\ \{u_{ij}\}$ – матрица разбиения; d – расстояние между центрами кластеров, которое считается по формуле 3:

$$d_A^2\left(m_j, c^{(l)}\right) = \left\| m_j - c^{(i)} \right\|_A^2 \tag{3}$$

5) Проверить условие $\left| U^l - U^{l-1} \right| < \delta$. Если оно выполняется, то завершить алгоритм, если нет, то перейти к следующей итерации $l + 1$.

Визуализация работы алгоритма представлена на рис. 1:

Самым главным параметром для определения скорости каждого из алгоритмов является количество сравнений или расчетов дистанций на каждой итерации. Эту переменную можно назвать *Cpi* (Comparisons per iteration). В данном случае при каждой итерации мы сравниваем все элементы выборки с каждым центром. В итоге получаем такую скорость (формула 4):

$$Cpi = nc * M, \tag{4}$$

где *nc* – количество центров; *M* – количество элементов выборки.

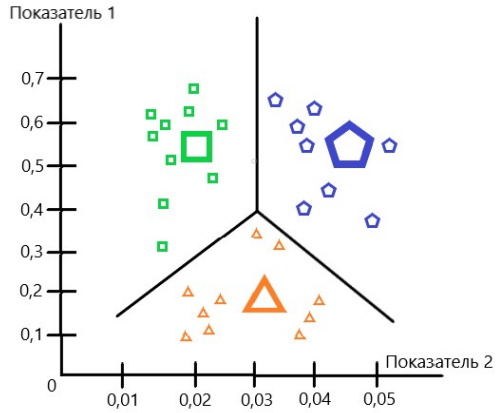


Рис. 1. Пример работы алгоритма К-средних [5]

Иерархический алгоритм. Иерархический алгоритм, который старается при каждой итерации поделить все множество элементов выборки в зависимости от расстояния элементов, создавая больше подмножеств в виде дерева. В итоге получается древовидная диаграмма, также называемая дендрограммой, которая показывает зависимости между кластерами [3]. Главным отличием этого алгоритма является то, что нет необходимости сравнивать подгруппы между собой при каждом шаге итерации. Это свойство позволяет сократить общее количество сравнений и подсчетов на каждом шаге из-за того, что мы разделяем числа в геометрической прогрессии на более мелкие.

Задачи алгоритма:

– Векторизация данных, где объекты получают свой “вес” в зависимости от частоты появления искомого признака;

– Настройка параметров кластеризации;

– Кластеризация полученных данных в зависимости от их веса;

– Анализ получившейся структуры, при неудовлетворении условия выхода, возвращение на второй этап.

Для визуализации работы алгоритма строится диаграмма-дерево, показывающее сгруппированные вместе выборки по среднему весу включенных в них объектов, представленная на рис. 2:

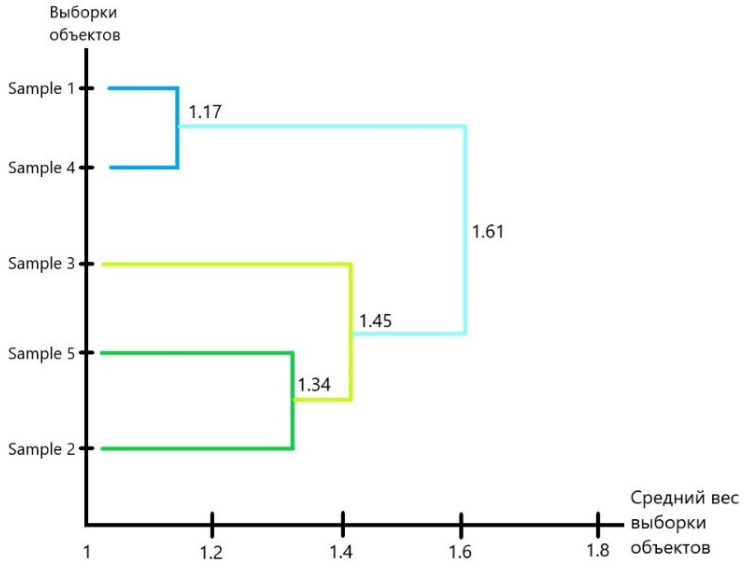


Рис. 2. Пример работы Иерархической кластеризации [5]

При снижении количества элементов во многих подмножествах получается меньше необходимых проверок, по сравнению с общим множеством. Это можно видеть в формуле 5, о количестве проверок в полном множестве элементов:

$$Cpi = M * (M - 1) = M^2 - M \quad (5)$$

Сравнение с формулой 6, которая учитывает количество подмножеств:

$$Cpi = nm * \left(\frac{M}{nm} * \left(\frac{M}{nm} - 1 \right) \right) = \frac{M^2}{nm} - M, \quad (6)$$

где nm – количество подмножеств; M – количество элементов выборки.

Это свойство демонстрируется на рис. 3.

DBSCAN алгоритм. DBSCAN алгоритм присваивает всем элементам выборки показатель плотности, сортирует их в кластеры по нему или принимает как вбросами, если этот показатель далеко расположен от остальной выборки [4]. Последним свойством этот алгоритм отличается от остальных, так как позволяет эффективно работать с данными, что могут понизить точность других алгоритмов кластеризации. При реализации этого алгоритма каждому

элементу выборки присваивается по два параметра: *Eps* – радиус объекта, вокруг которого должны присутствовать соседние элементы; *MinPts* – минимальное количество соседних элементов в радиусе *Eps*, при котором объект будет принадлежать определенному кластеру.

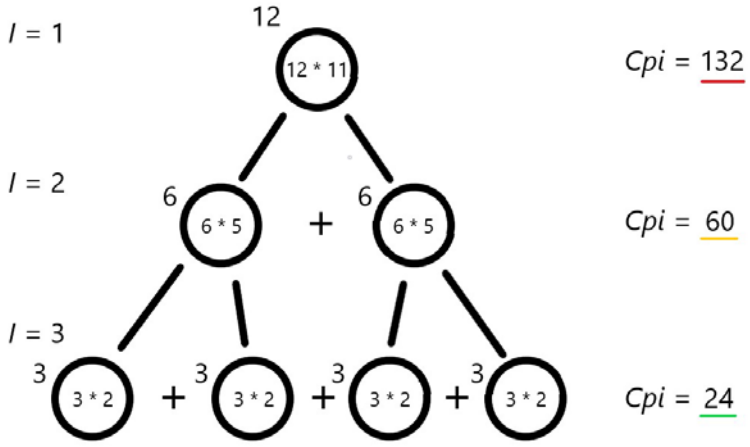


Рис. 3. Зависимость количества проверок от размера подмножеств

Таким образом подтверждение присущности к кластеру определяется тем, находится ли рядом с элементом достаточно соседей. Этот же принцип позволяет обнаруживать элементы, которые из-за расстояния не попали в существующие кластеры, и объявлять их вбросами, чтобы они не нарушали точность всего алгоритма. В то же время этот алгоритм не очень эффективен при работе с близко расположенными выборками данных, так как могут возникнуть пересечения и понизится точность кластеризации.

Визуальный пример работы алгоритма представлен на рис. 4:

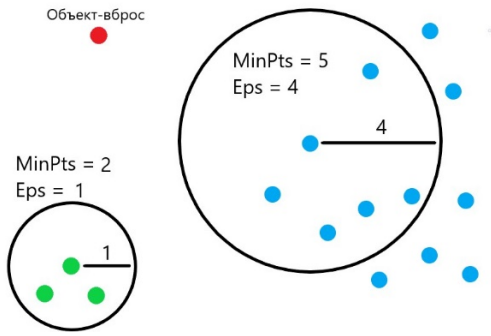


Рис. 4. Пример работы алгоритма DBSCAN [5]

С другой стороны при каждой итерации каждый объект должен быть сравнен со всеми остальными объектами по расстоянию, поэтому алгоритм DBSCAN является одним из самых затратных по ресурсам выполнения. Скорость для него рассчитывается по формуле 5.

Взаимодействие с файловой системой

Для использования этой технологии разрабатывается приложение для кластеризации файлов, которое также включает в себя несколько таких алгоритмов, каждый из которых имеет свои достоинства и некоторые недостатки:

– K-средних поможет, если необходимо задать определенное количество кластеров, но не сможет определить их количество самостоятельно, также отличается высокой скоростью [2];

– Иерархический алгоритм создаст древовидную структуру кластеров, что может помочь при необходимости структурированности данных или в особых системах [3];

– DBSCAN алгоритм позволяет определить “объекты-вбросы”, которые слишком сильно отличаются от остального массива данных, повышая при этом точность за счет скорости самого алгоритма [4].

Полная схема сравнения алгоритмов кластеризации, а также их полезные особенности при работе с файловой системой, приведена в таблице:

Сравнительный анализ алгоритмов кластеризации

Критерии	K-средних	Иерархический	DBSCAN
Скорость работы алгоритма от количества сравнений	$nc * M$	$\frac{M^2}{nm} - M$	$M^2 - M$
Проверка на отдаленные объекты	Не имеется	Не имеется	Имеется
Возможность указания количества кластеров вручную	Имеется	Имеется	Не имеется
Использование имен файлов как размерностей выборки	Возможно	Предпочтительно	Возможно
Точность при близких кластерах	Высокая	Высокая	Низкая
Структурированная система кластеров	Не имеется	Имеется	Не имеется

При использовании этих алгоритмов с файловой системой важно отметить, по каким параметрам будет происходить классификация файлов. Также данные параметры должны быть универсальными для всех систем, чтобы достичь приложению кроссплатформенности и последующего облегчения разработки данных алгоритмов. Для работы всех представленных алгоритмов требуются как минимум две переменные, которыми могут служить:

– размер файла;
– расширение файла;
– имя файла;
– путь файла;
– содержание файла.

Имя и путь файла могут только использоваться, если обрабатываемый архив имеет обязательную и закономерную номенклатуру, с другой стороны, это они также позволят алгоритму различать файлы гораздо эффективнее, чем только используя размер и расширение. Расширение важно учитывать при архивации полученных кластеров для достижения наиболее эффективного сжатия файлов и сохранения места дискового пространства. Содержание можно использовать в некоторых случаях, но это может негативно повлиять на скорость обработки архива из-за необходимости чтения самих файлов.

Таким образом будет отмечено отличие между файлами в системе, и теперь они готовы к отправке в построенные кластеры.

Выводы. В данной статье были описаны несколько алгоритмов кластеризации: К-средних, Иерархический и DBSCAN, приведены графические примеры их работы, представлены особенности каждого из них при оптимизации дискового пространства, проведен анализ их скорости выполнения и эффективности в определенных ситуациях. Приведен метод использования данных алгоритмов в файловых системах.

Список литературы

1. Зимина Е.Ю., Фролов С.В. Кластеризация электрокардиограмм и оценка качества кластеризации // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского, 2019. С. 53.

2. Давыдов О.А. Анализ кластерных алгоритмов в задачах диагностики на примере алгоритма к-средних // Сборник научных трудов. Ответственный редактор В. В. Воронин. Хабаровск, 2019. С. 333-337.

3. Пономарев Д.С. Иерархическая кластеризация на языке R для производственно-экономических показателей пенитенциарной системы // Экономика. Информатика, 2023. С. 655-668.

4. Описание алгоритма DBSCAN [Электронный ресурс] URL: https://www.geeksforgeeks.org/dbscan-clustering-in-ml-density-based-clustering (дата обращения: 22.03.2024).

5. Олейник А.И. Машинное обучение для кластеризации файлов // "Научный аспект №5-2024" - Информ. Технологии – 2024 [Электронный ресурс] URL: https://na-journal.ru/5-2024-informacionnye-tekhnologii/13082-mashinnoe-obuchenie-dlya-klasterizacii-failov (дата обращения: 22.09.2024).

Олейник Антон Ильич, магистр, stadt77@mail.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА,

Петросян Лусинэ Эдуардовна, канд. экон. наук, доцент, Petrosyan@mirea.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

COMPARISON ANALISYS OF CLUSTERIZATION ALGORITHMS FOR OPTIMIZATION OF FILE SYSTEMS

A.I. Oleynik, L.E. Petrosyan

In this article a couple of clusterization algorithms will be reviewed for purposes of file systems optimizations with graphical demonstrations. From those will be reviewed such algorithms as K-means, Hierarchical and DBSCAN, will be discussed their differences and specialties in specific situations for current task. Also showcased the method of using files in clusterization algorithms.

Key words: machine learning, file system, clusterization, K-means, hierarchical algorithm, DBSCAN.

Oleynik Anton Ilich, master, stadt77@mail.ru, Russia, Moscow, Russian University of Technology MIREA,

Petrosyan Lusine Eduardovna, candidate of economical sciences, docent, Petrosyan@mirea.ru, Russia, Moscow, Russian University of Technology MIREA

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-683-684

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ В МЕДИЦИНСКОЙ СФЕРЕ

А.М. Григорьев, Л.Е. Алёхин

Данная статья посвящена анализу развития технологий дополненной реальности (AR) и их применения в медицинской сфере. Представлен исторический обзор эволюции AR, начиная с ранних экспериментов и разработок, которые заложили основу для современных приложений в различных отраслях, включая медицину. Описывается текущее состояние использования AR в медицинской сфере, охватывая такие направления, как хирургическая навигация, предоперационное планирование, диагностические процедуры и обучение медицинского персонала. Рассматриваются примеры внедрения AR в медицинскую практику, которые могут значительно расширить её функциональные возможности в будущем.

Ключевые слова: дополненная реальность, AR, здравоохранение, перспективы AR, хирургия, диагностика, обучение персонала, терапия, медицинские технологии, инновации в здравоохранении, цифровые технологии.

История дополненной реальности (AR) берет своё начало с разработок, связанных с виртуальной реальностью. Ещё в 1950–1960-х годах Мортон Хейлиг запатентовал симулятор Sensorama — систему, представлявшую собой виртуальную технологию, которая добавляла к визуальным образам различные тактильные ощущения, такие как воздушные потоки и вибрации. В 1968 году профессор Гарвардского университета Айван Сазерленд совместно с учеником Бобом Спрауллом разработали первую систему дополненной реальности на основе головного дисплея [1]. Этот стереоскопический дисплей позволял проецировать изображения с компьютера, изменяя угол обзора в зависимости от положения головы пользователя с помощью отслеживающего устройства. В дальнейшем AR получила массовое применение — в частности, в 1982 году Ден Рейтон создал прибор для отслеживания воздушных масс и погоды, который широко использовался в телевизионных прогнозах.

Дополненная реальность (AR, Augmented Reality) представляет собой воздействие информационных технологий на окружающий нас мир. Она позволяет добавлять в реальное пространство цифровые элементы или изменять ощущения пользователя с помощью специализированного оборудования. Интерактивная природа этой технологии даёт возможность накладывать виртуальные объекты поверх реальных в режиме реального времени. Виртуальная информация может быть представлена в виде текста, графических объектов, звуков или даже тактильных эффектов. Сам термин «дополненная реальность» предложил Том Кодел, сотрудник компании Boeing, в 1990 году, когда использовал полупрозрачные дисплеи для сборки самолётов, чтобы показывать рабочим чертежи и инструкции. В 1994 году Пол Милгром и Фумио Кисино предложили понятие «виртуальность – реальность», где дополненная реальность представлена как область, объединяющая элементы реального и виртуального миров. Результат добавления к воспринимаемым как элементы реального мира мнимых объектов, в большинстве случаев как вспомогательная информация и есть дополненная реальность [2].

Как развивающаяся технология, AR привлекла интерес исследователей из разных областей. Такие компании, как Google и Microsoft, создали AR-устройства, такие как Google Glass и HoloLens, обеспечив аппаратную основу для последующих исследований. С помощью исследователей и компаний AR быстро развивается и внедряется во многих областях, таких как медицина, техническое обслуживание и культурное наследие. Здравоохранение стало одним из первопроходцев, особенно для приложений, требующих руководства и помощи. Например, AR был признан эффективным методом в медицинском образовании и обучении, хирургической навигации и желудочно-кишечной эндоскопии [3].

Современные технологии дополненной реальности представляют собой мощный инструмент, способный значительно повысить качество медицинских услуг в различных областях, таких как диагностика, лечение и обучение медицинских специалистов. В последние годы наблюдается активное внедрение AR в медицинскую практику, что раскрывает её потенциал для решения широкого спектра клинических задач.

Применение дополненной реальности в медицине охватывает такие направления, как хирургия, кардиология, офтальмология, стоматология, а также терапия когнитивных и психических расстройств. В хирургии AR позволяет добиться высокой точности операций за счёт визуализации анатомических структур в режиме реального времени, что особенно важно при малоинвазивных процедурах. Это позволяет хирургу видеть скрытые или трудно различимые структуры, такие как сосуды, нервы и опухоли, что уменьшает риски для пациента и повышает точность вмешательства. В кардиологии AR используется для предоперационного планирования, что особенно полезно для сложных процедур. Кардиологам дополненная реальность помогает при обсуждении лечения с пациентами, визуально демонстрируя анатомические особенности и планируемые манипуляции, что снижает уровень тревожности и улучшает понимание лечения [3].

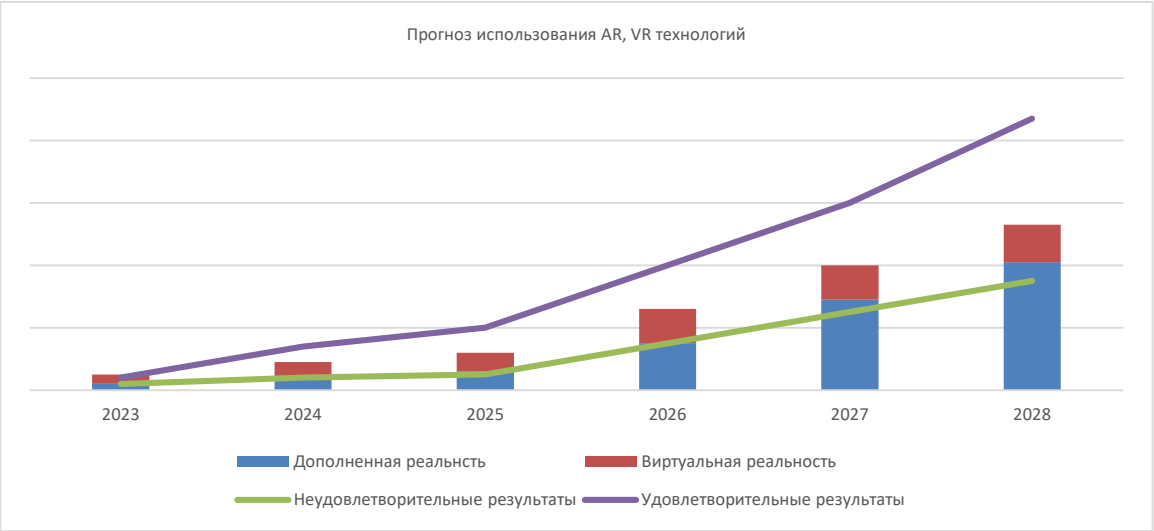
Особое значение имеет применение AR в подготовке медицинских специалистов. Например, симуляторы с элементами дополненной реальности позволяют врачам отработать навыки выполнения малоинвазивных вмешательств и диагностических процедур, погружаясь в медицинские сценарии, созданные на основе реальных данных. Это особенно полезно для студентов, которые таким образом могут совершенствовать свои навыки до начала клинической практики, выполняя манипуляции в безопасной среде. Подобные виртуальные симуляции помогают обучающимся осваивать сложные техники без риска для пациентов, что сокращает время на профессиональную подготовку.

В офтальмологии AR занимает уникальное место благодаря тесной связи этой области с визуальными технологиями. Дополненная реальность используется как для диагностики, так и для терапии и профилактики различных заболеваний зрения. Например, она помогает пациентам с дефектами поля зрения, такими как глаукома или ретинит, адаптироваться к условиям повседневной жизни. AR-очки помогают таким пациентам расширить поле зрения, компенсируя ограничения, вызванные заболеваниями. Дополнительно AR-технологии могут быть полезны пациентам с дальтонизмом: специальные алгоритмы преобразуют цвета в спектр, который лучше воспринимается та-

кими людьми, что облегчает выполнение повседневных задач. В хирургической навигации AR также незаменима — она помогает точно совместить данные компьютерной томографии с реальным изображением глаза во время операций, таких как глубокая передняя ламеллярная кератопластика, что значительно снижает риск осложнений и улучшает прогноз [4].

Применение AR-технологий имеет высокий потенциал не только для лечения физических заболеваний, но и для терапии когнитивных и психических расстройств. Исследования показывают, что VR и AR могут успешно использоваться в лечении тревожных расстройств и фобий, а также в реабилитации пациентов, перенесших инсульт. Дополненная реальность позволяет проводить экспозиционную терапию в контролируемых условиях, помогая пациентам работать со страхами и стрессом. При этом AR-технологии активно используются для восстановления памяти, улучшения внимания и тренировки многозадачности, что особенно полезно в случае когнитивных нарушений, связанных с возрастом или последствиями инсульта.

На сегодняшний день использование AR в здравоохранении вышло за рамки экспериментальных проектов и активно применяется в медицинских учреждениях разных стран. Эти технологии помогают повысить качество диагностики и лечения, а также улучшить доступность медицинских услуг. Внедрение дополненной реальности позволяет медицинским работникам получать дополнительную информацию прямо во время процедур, что особенно полезно в сложных случаях, требующих высокой точности. Глобальный рынок AR и VR в здравоохранении продолжит расти, охватывая различные направления — от больниц и клиник до исследовательских центров и фармацевтических компаний.



Прогнозирование роста AR и VR до 2028 года

Согласно прогнозам IDC (рисунок), ведущим фактором роста глобального рынка VR/AR, который к 2028 году может достичь объёма 120 млрд. долларов, станет расширение возможностей дополненной реальности на мобильных устройствах. При этом доля AR ожидается существенно выше — до 95 миллиардов долларов, в то время как на VR придётся 25 миллиардов. Ожидается также интеграция технологий искусственного интеллекта в AR-решения для производства, что повлияет на увеличение продаж и, по прогнозам, к 2028 году приведёт к выпуску около 23 млн. гарнитур [5].

Примером использования AR в медицинских целях стала Япония, где при помощи фельдшеров были начаты испытания умных очков Vuzix M400. Эти очки позволяют передавать данные о состоянии пациента в режиме реального времени, обеспечивая прямую связь между скорой помощью и клиникой. Благодаря этому врачи получают доступ к ключевой информации о состоянии пациента до его поступления в больницу, что позволяет поставить предварительный диагноз и дать фельдшерам конкретные рекомендации для оперативной помощи. В дальнейшем планируется использовать очки для обучения медицинского персонала и проведения телехирургии. Vuzix M400 отличаются высокой степенью защищённости — они устойчивы к ударам, влаге и пыли, имеют разрешение 4K и работают со скоростью 60 кадров в секунду. Управление очками осуществляется голосом, жестами или датчиками на оправе, а время автономной работы варьируется от 2 до 12 часов. Конечно, доктора также смогут взаимодействовать как устно, так и визуально с коллегами, находящимися в машине, задавая им вопросы и получая ответы по мере необходимости. До недавних пор в больницах ограничивались устной телефонной или радиосвязью. Основываясь на всей собранной информации, врачи смогут посоветовать коллегам, какие действия следует предпринять, пока они еще находятся в пути. Кроме того, они сумеют провести все необходимые приготовления в больнице, чтобы оптимальное лечение можно было начать сразу же по прибытии пациента [6].

Использование AR для медицинских целей распространяется не только в Японии. В других странах также появляются подобные проекты, демонстрирующие эффективность AR-технологий для улучшения качества медицинской помощи. Так, в США создана система XVS, которая применяется для минимально инвазивных хирургических вмешательств и позволяет проецировать трёхмерное изображение позвоночника пациента прямо на сетчатку хирурга с помощью специальной AR-гарнитуры. Этот метод даёт хирургу возможность видеть внутренние структуры, такие как мышцы и кости, что значительно повышает точность выполнения операций. Генеральный директор Augmedics Ниссан Элимелех отметил, что традиционные хирургические навигационные системы заставляют врачей смотреть либо на пациента, либо на удаленный экран, что негативно сказывается на точности и эффективности операций. Кроме того, традиционные технологии часто крупногабаритные и дорогостоящие, тогда как AR-гарнитура

отличается меньшими размерами, стоимостью и совместимостью с другими медицинскими приборами. В будущем планируется адаптация Xvision для использования в других типах операций, помимо позвоночных. Компания Augmedics уже приступила к приёму заказов и готовится начать поставки в начале следующего года [7].

В штате Техас хирурги также активно используют AR для проведения сложных операций. В Университете Альберты ведутся исследования по применению дополненной реальности с целью уменьшить необходимость в диагностических хирургических процедурах. Недавно синусовые хирурги из Центра здоровья Университета Техаса (UTHealth) в Хьюстоне и Медицинского центра «Мемориал Херманн-Техас» успешно использовали AR-технологии для подготовки и проведения операции. Заведующий кафедрой оториноларингологии и хирургии головы и шеи медицинской школы МакГоверн при UTHealth Мартин Дж. Ситарди руководил этим процессом. В процессе "ревизионной эндоскопической хирургии синуса" специалисты использовали AR и технологию картирования для лечения хронического риносинусита, а также для устранения сложных блокировок в носовых пазухах. Операция была выполнена с применением системы Scopis Target Guided Surgery (TGS) от компании Stryker. Эта система накладывает виртуальный хирургический план на эндоскопическое изображение, позволяя хирургу видеть операционное поле в режиме реального времени. AR-указатель помогает хирургу точно следовать заданному маршруту, избегая при этом повреждения важных анатомических структур. «Эта система позволяет не только проводить операции с высокой точностью, но и записывать их, включая этапы хирургического планирования. Подобный цифровой контент представляет собой ценное учебное пособие для подготовки хирургов в сложной области эндоскопии носовых пазух, что в итоге положительно сказывается на пациентах», — отметил Ситарди. Эти примеры показывают, как технологии дополненной реальности становятся неотъемлемой частью современной медицины, помогая как в диагностике, так и при проведении сложных хирургических вмешательств [8].

В Германии совместно с Merck и Furhat Robotics был разработан робот Petra, способный выявлять три распространённых заболевания: гипотиреоз, алкоголизм и преддиабет. В дополнение к этому другие современные системы помогают врачам в диагностике: технологии дополненной реальности позволяют видеть скрытые от человеческого глаза структуры, а искусственный интеллект обеспечивает быстрый анализ рентгеновских снимков, что повышает точность диагностики.

В Израиле врачи из Медицинского центра Galilee недавно успешно применили технологии AR и 3D-моделирования для лечения перелома глазной впадины у молодого пациента. Перед хирургическим вмешательством была создана трёхмерная модель черепа, по которой затем распечатали титановые пластины, учитывающие особенности структуры кости пациента на основе компьютерной томографии. Во время операции один из хирургов использовал очки дополненной реальности Microsoft HoloLens, которые проецировали модель черепа с пластиной прямо на оперируемую область. Это дало возможность идеально сопоставить положение пластины с анатомическими ориентирами черепа. Операция заняла около полутора часов, и пациент смог вернуться домой уже через несколько дней [9].

Данные примеры являются лишь началом развития AR-медицины, поскольку потенциал реализации данной технологии попросту огромен в нынешнее время.

Российские эксперты считают, что включение направления «Цифровое здравоохранение» в программу «Цифровая экономика» станет стимулом для развития инновационных проектов, направленных на диагностику и лечение приоритетных заболеваний [10].

Среди технологий, на которые в подпрограмме «Цифровое здравоохранение» будет обращено особое внимание, выделяются дополненная (AR) и виртуальная реальность (VR). Эти технологии уже несколько лет занимают ведущие позиции в списке наиболее перспективных. По мнению аналитиков из Boston Consulting Group (BCG), AR и VR — это ключевые элементы Индустрии 4.0, которые трансформируют производство и изменят способы взаимодействия между человеком и техникой.

Заключение. Технологии дополненной реальности обладают значительным потенциалом для улучшения медицины, открывая новые возможности для диагностики, лечения и обучения медицинских специалистов. Современный опыт её применения в медицинской практике подтверждают её эффективность в таких областях, как хирургия, кардиология, офтальмология и терапия психических расстройств. Несмотря на существующие проблемы, такие как высокая стоимость технологий и необходимость дальнейшего совершенствования аппаратного и программного обеспечения, перспективы развития AR в медицине остаются многообещающими. Совершенствование устройств и алгоритмов взаимодействия открывают возможности для более широкого применения этой технологии в различных областях медицины. Внедрение дополненной реальности в медицинскую практику позволит повысить качество и доступность медицинских услуг, а также вывести здравоохранение на новый уровень эффективности и точности.

Список источников

1. Адзума Р.Т. Обзор дополненной реальности // Присутствие: телеоператоры и виртуальные среды. 1997. Том. 6, № 4. С. 355-385.

2. Маслова Ю.А., Белов Ю.С. Технологии дополненной реальности. E-Scio, 2022. (2 (65)). P. 313-322.

3. Николаев В.А., Николаев А.А. Опыт и перспективы использования технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальности в условиях цифровой трансформации системы здравоохранения // Медицинские технологии. Оценка и выбор, 2020. No. 2 (40). P. 35-42.

4. Li Tongkeng, Li Chenghao, Zhang Xiayin, Liang Wenting, Chen Yongxin, Ye Yunpeng, Lin Haotian. Augmented Reality in Ophthalmology: Applications and Challenges. Frontiers in Medicine. 2021. 8. 733241. 10.3389/fmed.2021.733241.

5. IDC Forecasts Robust Growth for AR/VR Headset Shipments Fueled by the Rise of Mixed Reality // IDC. [Электронный ресурс] URL: https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS51971224 (дата обращения: 10.05.2024).

6. Vuzix M400 smart glasses begin use case in Japan for ambulance emergency medical care // Vuzix. [Электронный ресурс] URL: https://www.vuzix.com/blogs/press-releases/vuzix-m400-smart-glasses-begin-use-case-in-japan-for-ambulance-emergency-medical-care (дата обращения: 10.05.2024).

7. «Рентгеновский AR» // Рамблер/доктор. [Электронный ресурс] URL: https://doctor.rambler.ru/news/43415039-v-ssha-pridumali-rentgenovskiy-ar-dopolnennuyu-realnost-dlya-hirurgov (дата обращения: 10.05.2024).

8. Хирурги в Техасе используют AR в сложных операциях [Электронный ресурс] // VR Journal. [Электронный ресурс] URL: https://vr-j.ru/news/hirurgi-v-tehase-ispolzuyut-ar-v-slozhnyh-operatsiyah (дата обращения: 10.05.2024).

9. Будущее за медициной 4.0 [Электронный ресурс] // deutschland.de. [Электронный ресурс] URL: https://www.deutschland.de/ru/topic/ekonomika/medicina-40-v-germanii-cifrovizaciya-i-ii (дата обращения: 10.05.2024).

10. Черченко О.В. (2018) Технологии дополненной и виртуальной реальности в медицине: анализ конкурентного ландшафта // Экономика науки. Т. 4. № 1. С.69–80.

Григорьев Александр Максимович, магистрант, petrosyan1919@list.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА,

Алёхин Лев Евгеньевич, студент, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF AUGMENTED REALITY TECHNOLOGY IN THE MEDICAL FIELD

A.M. Grigoriev, L.E. Alekhine

This paper analyzes the development of augmented reality (AR) technologies and their application in the medical field. A historical overview of the evolution of AR is presented, starting with early experiments and developments that laid the foundation for modern applications in various industries, including medicine. The current state of AR use in the medical field is described, covering areas such as surgical navigation, preoperative planning, diagnostic procedures, and training of medical personnel. Examples of AR implementation in medical practice that may significantly expand its functionality in the future are discussed.

Key words: augmented Reality, AR, healthcare, AR perspectives, surgery, diagnostics, personnel training, therapy, medical technologies, innovations in healthcare, digital technologies.

Grigoriev Alexander Maksimovich, undergraduate, petrosyan1919@list.ru , Russia, Moscow, Russian Technological University MIREA,

Alyokhin Lev Evgenyevich, student, Russian Federation, Moscow, Russian Technological University MIREA

УДК 004.4'2
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-686-687

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАТИВНОГО И КРОССПЛАТФОРМЕННОГО ПОДХОДОВ К РАЗРАБОТКЕ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Р.С. Каширин

Рассматриваются основные преимущества и недостатки нативного и кроссплатформенного подходов к разработке мобильных приложений. Исследуется опыт разработчиков в области применения рассматриваемых технологий. В ходе практического тестирования анализируются приложения в заранее определенных тестовых случаях, разработанные с использованием обоих методов.

Ключевые слова: мобильная разработка, кроссплатформенная разработка, Андроид, Айос, Котлин Мультиплатформ, Флаттер, Котлин, Свифт.

С каждым годом значимость мобильных устройств в жизни человека растет, соответственно, разработка приложений под мобильные операционные системы актуальна как никогда. Согласно статистике за последние годы, изображённой на рис. 1, на рынке преобладают устройства с двумя операционными системами: Android и IOS [1].

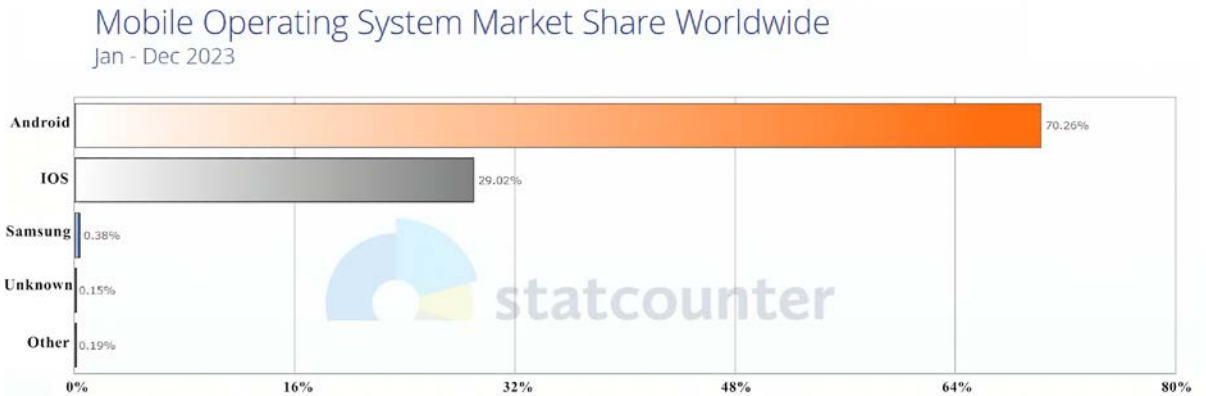


Рис. 1. Статистика продаж мобильных устройств с различными операционными системами за 2023 год

Чтобы поддерживать обе операционные системы, разработчик может выбрать два пути:

− Использовать нативную разработку и писать отдельное приложение под каждую платформу.

− Использовать кроссплатформенную разработку и писать общую кодовую базу сразу и для IOS и для Android.

Наиболее актуальным нативным подходом является применение декларативных принципов – использование набора инструментов Jetpack Compose для Android и использование фреймворка SwiftUI для IOS. А говоря о кроссплатформенной разработке, можно отметить, что сегодня существует множество фреймворков, которые активно используются разработчиками. Эти фреймворки представлены на рис. 2 [2]. Среди них наиболее популярными являются Flutter и React Native. Однако стоит отметить, что появилась и новая перспективная технология - Kotlin Multiplatform. Она быстро набирает популярность и уже оказывает заметное влияние на рынок [3].

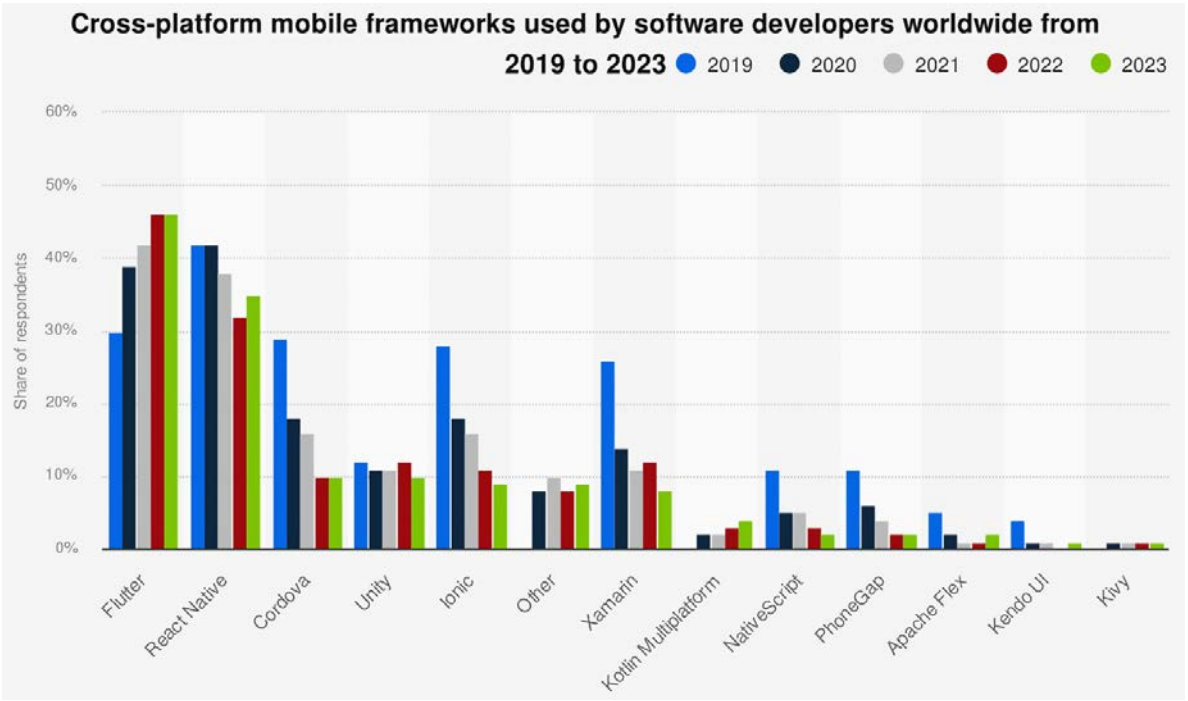


Рис. 2. Статистика использования разработчиками кроссплатформенных мобильных фреймворков за 2019-2023 года

У нативного и кроссплатформенного подходов к разработке мобильных приложений есть свои преимущества и недостатки. Долгое время ведутся активные дискуссии относительно того, насколько кроссплатформенная разработка эффективна и оправдана в долгосрочной перспективе. Некоторые эксперты считают, что такие решения уступают в производительности и функциональности нативным приложениям, а также усложняют поддержку приложений [6-8]. Другие эксперты, несмотря на недостатки кроссплатформенного подхода, указывают на большее количество преимуществ, в том числе на экономические преимущества. Они также отмечают, что 70% компаний готовы рассмотреть кроссплатформенный подход вместо нативного [9].

Стоит учесть выводы компании AGIMA из их сравнения нативной и кроссплатформенной мобильной разработки [10]. К плюсам нативной разработки они относят: производительность и стабильность, меньшее количество потребляемых ресурсов, богатый инструментарий для разработки, широкий рынок разработчиков. Из минусов выделяют необходимость иметь два независимых приложения, проблемы с синхронизациями платформ, и стоимость разработки и отладки. К плюсам кроссплатформенной разработки они относят: единую кодовую базу, меньшие затраты на разработку, скорость разработки. Из минусов кроссплатформы выделяют: потенциальные риски, ресурсоемкость, сложность в поиске исполнителей, ограничения по дизайну.

На примере анализа разработчиков из компании Apter, отображенного на рис.3, можно увидеть, что трудозатраты на разработку с применением кроссплатформенного подхода, в данном случае с использованием Kotlin Multiplatform, более чем в два раза превышают затраты с использованием нативных технологий [11]. Сомневаться в данном анализе не приходится, ведь можно легко понять, что если для нативной разработки требуется как минимум два специалиста — по одному на каждую платформу, то используя кроссплатформу можно обойтись всего одним разработчиком.

Методология. Чтобы лучше понять различия между двумя рассматриваемыми подходами к разработке и самостоятельно оценить их сильные и слабые стороны, с помощью четырех технологий были написаны мобильные приложения, изображенные на рис. 4-6, являющиеся вариантами одного несложного приложения, показывающего некоторое количество постеров популярных фильмов [12]. Нативное IOS приложение было написано с помощью среды разработки Xcode, остальные приложения были написаны с помощью среды разработки Android Studio. В качестве используемых кроссплатформенных технологий были выбраны Flutter – самый популярный кроссплатформенный фреймворк, и Kotlin Multiplatform – самая молодая и наиболее перспективная кроссплатформенная технология.

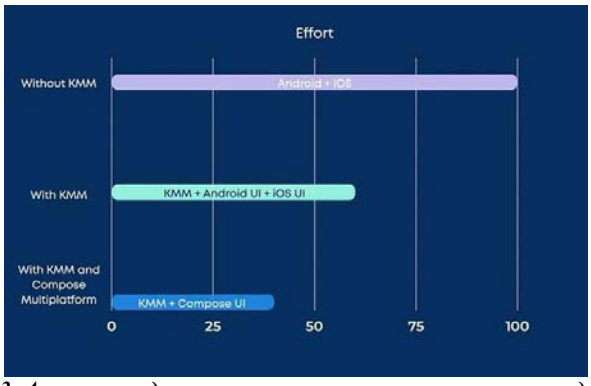


Рис. 3. Анализ трудозатрат при использовании разных подходов

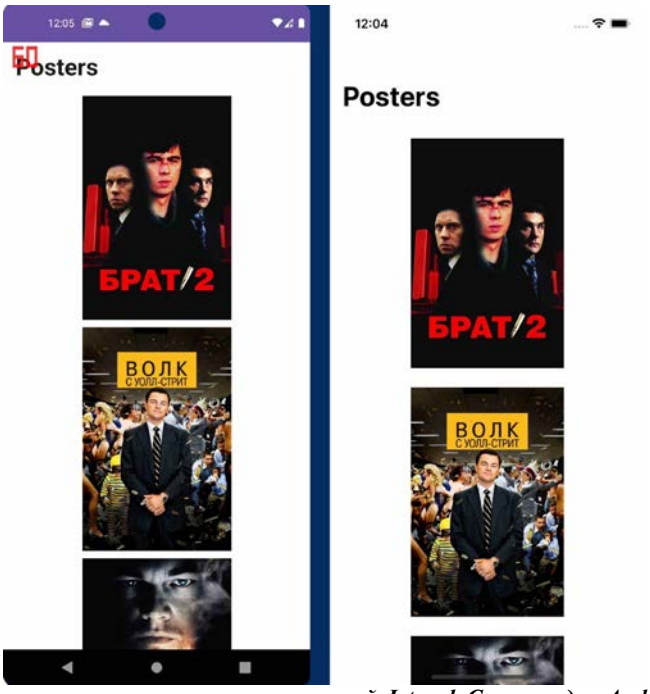


Рис. 4. Приложение, написанное с помощью технологий Jetpack Compose для Android и SwiftUI для IOS

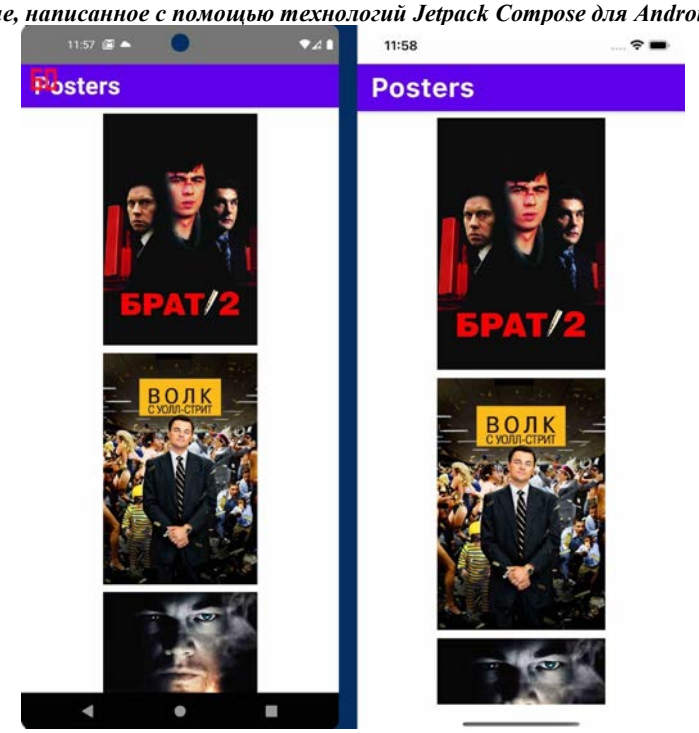


Рис. 5. Приложение, написанное с помощью технологии Kotlin Multiplatform для Android и IOS



Рис. 6. Приложение, написанное с помощью технологии Flutter для Android и IOS

Написанное приложение было протестировано на тестовых случаях, которые были тщательно подобраны для обеспечения репрезентативного охвата производительности мобильного приложения. Рассмотрим более подробно тестовые случаи и их значимость в работе приложения:

− Вес приложения: измеряется в мегабайтах (МБ) при помощи инструментов среды разработки, предоставляющей данные о релизной сборке. Чем больше вес приложения, тем больше места оно занимает в памяти устройства, что может стать проблемой для пользователей с ограниченным объемом памяти, а также повлечет за собой увеличенное время загрузки из магазина приложений или других источников.

− Время запуска: измеряется повторный запуск в секундах (С), начиная от нажатия на иконку приложения до его полной загрузки. С помощью данного параметра можно проверить, насколько кроссплатформенные фреймворки оптимизированы на загрузку по сравнению с нативными решениями;

− Кадров в секунду: измеряется количество кадров, которое приложение отображает в секунду средствами среды разработки, позволяющими вывести соответствующий счетчик и зафиксировать результаты, важный показатель плавности анимации и интерфейса;

− Использование памяти: измеряется в мегабайтах (МБ) средствами среды разработки, позволяющими осуществлять мониторинг потребляемых ресурсов в реальном времени. Высокое потребления оперативной памяти может привести к снижению производительности не только самого приложения, но и всей операционной системы устройства.

Итоговые результаты тестирования написанных приложений с помощью определенных тестовых случаев приведены в табл. 1. Чтобы исключить влияние окружения, или следов эксплуатации реальных устройств, приложение тестировалось на эмуляторах устройств. В качестве Android устройства использовался эмулятор Google Pixel 6 под управлением ОС Android 11, а в качестве IOS устройства использовался эмулятор Apple IPhone 13 под управлением ОС IOS 13.

Тестирование мобильного приложения на разных платформах

Тестовые случаи	Технология и платформа					
	Compose	SwiftUI	Kotlin Multiplatform		Flutter	
	Android	IOS	Android	IOS	Android	IOS
Вес приложения (МБ)	7,7	2,1	9,1	5	20	7,8
Время запуска (С)	0,96	0,9	1,05	0,96	1,6	1,35
Кадров в секунду	55-60	60	55-60	55-60	35-60	54-60
Использование памяти (МБ)	200	50	204	175	308	268

Результаты исследования. Прежде чем приступить к анализу результатов тестирования, стоит обратить внимание на окружение, предоставляемое средами разработки для каждого метода. Иерархии проектов всех рассматриваемых технологий приведены на рис. 7. Кроссплатформенные решения включают в свои проекты гораздо больше папок и подуровней, что, несомненно, может отпугнуть и запутать начинающего разработчика при первом знакомстве. В отличие от них, нативные решения обладают более лаконичной и понятной структурой файлов и папок. Особенно стоит отметить среду разработки Xcode и фреймворк SwiftUI.

Возвращаясь к результатам тестирования, взглянув на полученные данные, можно заметить явную закономерность. Во всех тестовых случаях производительность приложений, написанных именно с помощью нативных технологий, значительно превосходит производительность кроссплатформенных решений. При использовании кроссплатформы вес приложения значительно увеличился — примерно в 2,5 раза. Хотя тестируемое приложение небольшое, и для него это увеличение веса не является критичным, в случае полноценных и более сложных приложений такое ухудшение характеристики может существенно повлиять на пользователей. Это неудивительно, ведь

кроссплатформенные фреймворки содержат множество библиотек и дополнительных материалов, которые требуются для работы на всех платформах. Кроме того, было отмечено значительное увеличение потребления оперативной памяти — более чем в 2,5 раза.



Рис. 7. Сравнение иерархии проектов

Выводы. Основываясь на данных собственного тестирования и отзывах разработчиков о двух рассматриваемых подходах, можно сделать следующий вывод: если требуется создать приложение быстро, с минимальными затратами и с большим охватом аудитории без лишних сложностей, то стоит выбрать одну из технологий кроссплатформенного подхода. Однако стоит учесть, что в этом случае пользовательский опыт может быть не самым лучшим. Нативный подход стоит выбрать, если разработчик только начинает своё знакомство с миром мобильной разработки, а также если планируется долгосрочная поддержка приложения и есть ресурсы для разработки эстетичной и эффективной системы.

Список литературы

1. Mobile Operating System Market Share Worldwide. [Электронный ресурс] URL: https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide/2023 (дата обращения: 10.05.2024).
2. Cross-platform mobile frameworks used by software developers worldwide from 2019 to 2023. [Электронный ресурс] URL: https://www.statista.com/statistics/869224/worldwide-software-developer-working-hours (дата обращения: 10.05.2024).
3. The Six Most Popular Cross-Platform App Development Frameworks. [Электронный ресурс] URL: https://www.jetbrains.com/help/kotlin-multiplatform-dev/cross-platform-frameworks.html (дата обращения: 10.05.2024).
4. Android Developers. Quick start. [Электронный ресурс] URL: https://developer.android.com/develop/ui/compose/setup (дата обращения: 10.05.2024).
5. Android Developers. Why adopt Compose. [Электронный ресурс] URL: https://developer.android.com/develop/ui/compose/why-adopt (дата обращения: 10.05.2024).
6. Что не так с кроссплатформенной разработкой. [Электронный ресурс] URL: https://vc.ru/u/640887-yuriy-pukhov/456197-chto-ne-tak-s-krossplatformennoi-razrabotkoi (дата обращения: 10.05.2024).
7. Flutter Failed To Solve the Biggest Challenge for Our Cross-Platform App. [Электронный ресурс] URL: https://betterprogramming.pub/flutter-failed-to-solve-the-biggest-challenge-for-our-cross-platform-app-c551afa0ef18 (дата обращения: 10.05.2024).
8. Внедрять Kotlin Multiplatform легко. Масштабировать сложно[Электронный ресурс] URL: https://apptractor.ru/info/articles/vnedryat-kotlin-multiplatform-legko-masshtabirovat-slozhno.html (дата обращения: 10.05.2024).
9. The Future of Cross-Platform Development vs Native Apps. [Электронный ресурс] URL: https://moldstud.com/articles/p-the-future-of-cross-platform-development-vs-native-apps (дата обращения: 10.05.2024).
10. Петросян Л.Э. Монографи. Разработка мобильных приложений на Kotlin практикум. [Электронный ресурс] URL: https://ibc.mirea.ru/books/share/55236 (дата обращения: 10.05.2024).
11. Мобильная разработка: Cross-platform или Native. [Электронный ресурс] URL: https://habr.com/ru/companies/agima/articles/586092 (дата обращения: 10.05.2024).
12. Implementing a 2-month Large-scale Banking POC with Kotlin Multiplatform. [Электронный ресурс] URL: https://blog.apter.tech/implementing-a-2-month-large-scale-banking-poc-with-kotlin-multiplatform-mobile-12ab887afb (дата обращения: 10.05.2024).

13. RodionK77, CrossPosters, (2024), GitHub repository. [Электронный ресурс] URL: https://github.com/RodionK77/CrossPosters/tree/master (дата обращения: 10.05.2024).

Каширин Родион Сергеевич, магистрант, kashirin.r.s@edu.mirea.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

COMPARATIVE ANALYSIS OF NATIVE AND CROSS-PLATFORM APPROACHES TO MOBILE APPLICATION DEVELOPMENT

The main advantages and disadvantages of native and cross-platform approaches to mobile application development are considered. The experience of developers in the field of application of the technologies under consideration is being investigated. In the course of practical testing, applications are analyzed in predefined test cases developed using both methods.

Key words: mobile development, cross-platform development, Android, Ios, Kotlin Multiplatform, Flutter, Kotlin, Swift.

Kashirin Rodion Sergeevich, master's, kashirin.r.s@edu.mirea.ru, Russia, Moscow, Russian University of Technology MIREA

УДК 004.94
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-691-692

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В БИЗНЕСЕ

А.М. Клочек, Н.Д. Садчиков

В статье рассматриваются основные характеристики АОМ, его преимущества, ограничения, а также конкретные примеры применения в бизнесе, такие как управление цепочками поставок, маркетинг и финансовые рынки. В дополнение к анализу преимуществ и недостатков данного метода, предложены рекомендации по его внедрению и развитию в компаниях для повышения эффективности принятия решений и снижения бизнес-рисков.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, принятие решений, управление цепочками поставок, маркетинг, финансовые рынки, оптимизация, бизнес-моделирование.

В современном мире бизнес сталкивается с множеством сложных задач, требующих быстрого и эффективного принятия решений. Одним из методов, который все чаще используется для решения этих задач, является агент-ориентированное моделирование (АОМ). Этот подход позволяет моделировать взаимодействия между различными агентами в сложных системах, что может существенно улучшить процесс принятия решений. В данной статье проводится анализ влияния агент-ориентированного моделирования на принятие решений в бизнесе, рассмотрим его преимущества и недостатки, а также предложим рекомендации по его внедрению.

Агент-ориентированное моделирование — это метод, основанный на использовании автономных агентов, которые взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой. Каждый агент может принимать собственные решения на основе заданных правил и информации, что позволяет моделировать сложные системы и процессы. Основные характеристики и их пояснения представлены в таблице 1 [1].

Характиристики и их описание АОМ

Характеристика	Описание
Автономность	Каждый агент действует независимо
Интерактивность	Агенты взаимодействуют друг с другом
Адаптивность	Агенты могут изменять свое поведение в ответ на изменения среды
Динамичность	Модели могут эволюционировать со временем

Разработка и настройка агент-ориентированных моделей (АОМ) включает в себя несколько ключевых методов и подходов, которые помогают создать эффективные и адаптивные модели. Основным этапом является создание агентов, что может включать использование стохастических моделей, позволяющих учитывать случайные изменения в поведении агентов, или предопределенные сценарии, которые задают четкие правила поведения в различных ситуациях. При этом важно тщательно настраивать параметры агентов, такие как их цели, ресурсы и стратегии взаимодействия с другими агентами. Эти параметры определяют, как агенты будут реагировать на изменения в окружающей среде и на действия других участников. Взаимодействия между агентами также требуют внимания: необходимо определить, как они будут обмениваться информацией, какие механизмы координации будут использоваться и как будут учитываться результаты этих взаимодействий.

Успешное внедрение АОМ в бизнес-процессы можно оценивать по нескольким критериям. Во-первых, важным маркером является улучшение точности прогнозирования, что позволяет компаниям более эффективно планировать свои действия и адаптироваться к изменениям на рынке. Во-вторых, снижение издержек является ключевым показателем, так как АОМ может помочь оптимизировать процессы и выявить неэффективные участки в цепочках поставок или производственных системах. Наконец, успешное внедрение АОМ должно приводить к оптимизации процессов, что включает в себя улучшение взаимодействия между различными подразделениями компании и повышение общей производительности. Оценка этих метрик поможет бизнесу адаптировать АОМ для достижения своих целей и максимизации его потенциала.

Применение АОМ в бизнесе. Агент-ориентированное моделирование (АОМ) находит применение в различных областях бизнеса, включая управление цепочками поставок, где оно позволяет моделировать взаимодействия между участниками, оптимизируя процессы и снижая затраты. В маркетинге АОМ помогает компаниям моделировать поведение потребителей и предсказывать реакции на маркетинговые кампании. В финансовых рынках АОМ используется для анализа поведения трейдеров и прогнозирования цен на активы, что делает его универсальным инструментом для повышения эффективности бизнес-процессов. [2].

АОМ позволяет моделировать взаимодействия между различными участниками цепочки поставок, включая поставщиков, производителей, дистрибьюторов и розничные сети. Это помогает выявить узкие места в процессе, оптимизировать маршруты доставки и снизить затраты. Расчет вычислений использования АОМ в управлении поставок представлена в формуле 1.

Формула 1. Пример использования АОМ в управлении цепочками поставок

$$C = \sum_{i=1}^{n} D\_i * \text{P\_i} \quad (1)$$

где C — общие затраты на поставку; D_i — объемы поставок от агента i; P_i — цена за единицу товара от агента i.

Внедрение агент-ориентированного моделирования (АОМ) в бизнес-процессы может существенно повысить экономическую эффективность компании. Рассмотрим несколько примеров расчета окупаемости АОМ и его влияние на бизнес [3].

Предположим, компания, занимающаяся производством и дистрибуцией товаров, внедрила АОМ для оптимизации своей цепочки поставок. До внедрения АОМ компания сталкивалась с высокими затратами на логистику и частыми задержками в доставке. После создания модели, которая учитывает взаимодействия между поставщиками, производителями и дистрибьюторами, компания смогла сократить время доставки на 20% и снизить логистические расходы на 15%.

В другом примере компания использовала АОМ для моделирования поведения потребителей в ответ на различные маркетинговые стратегии. Это позволило ей адаптировать свои кампании и повысить коэффициент конверсии. В результате компания увеличила продажи на 25% по сравнению с предыдущим годом.

Внедрение АОМ может привести к множеству выгод, включая:

1. Снижение затрат: Оптимизация процессов позволяет сократить издержки на логистику, производство и маркетинг.

2. Повышение доходов: Улучшение качества прогнозирования и адаптация к изменениям на рынке способствуют увеличению продаж.

3. Улучшение принятия решений: АОМ помогает выявлять скрытые зависимости и предсказывать последствия различных действий, что повышает качество управленческих решений.

В результате, компании, внедряющие АОМ, могут ожидать не только окупаемость своих инвестиций, но и значительное улучшение общей экономической эффективности, что укрепляет их конкурентные позиции на рынке.

Преимущества и недостатки агент-ориентированного моделирования. Агент-ориентированное моделирование (АОМ) обладает рядом преимуществ, которые делают его привлекательным для бизнеса. Во-первых, его гибкость и адаптивность позволяют моделировать множество индивидуальных агентов, каждый из которых принимает решения на основе собственных правил. Это особенно полезно для задач, где важно учитывать поведение клиентов, сотрудников или поставщиков, поскольку АОМ позволяет адаптироваться к изменениям в условиях рынка. Во-вторых, АОМ поддерживает моделирование как на микро-, так и на макроуровнях, что дает более полное представление о динамике и возможных эффектах вмешательства. Кроме того, моделирование взаимодействий между агентами помогает выявить скрытые зависимости и улучшает процесс принятия решений, что способствует повышению качества решений. АОМ также подходит для анализа сложных социальных и экономических взаимодействий, таких как конкуренция на рынке и поведение потребителей. Наконец, этот подход позволяет заранее оценить последствия различных решений, что снижает риски и повышает уверенность в принятии решений.

Тем не менее, агент-ориентированное моделирование имеет и свои недостатки. Сложность разработки моделей может потребовать значительных затрат времени и ресурсов. Кроме того, для успешного применения АОМ необходимы специалисты, обладающие знаниями в области моделирования и анализа данных. Проверка корректности моделей также может быть сложной задачей, особенно в динамичных и сложных системах. [4].

Сравнение АОМ с другими методами моделирования в бизнесе. Агент-ориентированное моделирование (АОМ) отличается от других методов тем, что фокусируется на моделировании поведения и взаимодействий отдельных агентов, что позволяет учитывать микроуровень системы и динамику взаимодействий. Чтобы понять, когда именно стоит использовать АОМ, важно рассмотреть его в сравнении с другими популярными методами моделирования:

1.**Системная динамика** предполагает моделирование на уровне системных потоков и запасов, фокусируясь на агрегированных переменных и влиянии обратных связей. Этот метод ориентирован на моделирование долгосрочной динамики системы в целом.Системная динамика лучше подходит для анализа макроуровневых изменений в сложных системах, где важны крупномасштабные тенденции и зависимости. Она неэффективна для моделирования сложного поведения отдельных субъектов (агентов), так как детализировать взаимодействия между ними становится трудно. АОМ оказывается предпочтительнее, когда нужно учесть поведение конкретных участников (например, покупателей или поставщиков).

2.Дискретно-событийное моделирование (DES) моделирует процессы, которые меняются только в определенные моменты времени, в основном используется для анализа систем обслуживания (например, работы очередей или потоков на производстве).DES подходит для оценки операций, где система переходит из одного состояния в другое через определенные события. Это делает DES идеальным для производственных процессов и сценариев с четкими операционными переходами. DES плохо подходит для моделирования сложных социальных взаимодействий или автономных поведений агентов. В этом случае АОМ может лучше отразить микроуровень и взаимодействия субъектов с окружающей средой.

3.Методы машинного обучения используют исторические данные для прогнозирования и классификации, улучшая точность предсказаний с увеличением объема данных. Методы машинного обучения полезны для поиска шаблонов и прогнозирования результатов. Подходы машинного обучения сильны в прогнозировании, например, покупательского поведения или рыночных тенденций, и могут использоваться для обогащения данных, на основе

которых работают агенты в АОМ. Машинное обучение само по себе не позволяет моделировать причинно-следственные связи между участниками, в отличие от АОМ, который сосредоточен на взаимодействиях и логике действий отдельных агентов [5].

Таким образом, АОМ будет предпочтительнее в задачах, где важно учитывать поведение на микроуровне и где наблюдаются множественные взаимодействия между участниками. Этот метод оказывается менее эффективным для анализа агрегированных данных, когда целью является прогноз макроуровневых тенденций.

Риски и барьеры для внедрения АОМ. Несмотря на явные преимущества агент-ориентированного моделирования (АОМ) для решения сложных задач, его внедрение в бизнес-процессы связано с рядом рисков и барьеров. Понимание этих потенциальных трудностей помогает компаниям более осознанно подходить к реализации АОМ и заранее подготовиться к возможным проблемам.

Главная трудность заключается в сложности разработки и настройки моделей. Поскольку создание АОМ требует тщательного учета поведения и взаимодействия агентов в бизнес-среде, каждый этап разработки требует затрат ресурсов и времени, чтобы охватить все необходимые детали. Отсутствие должного финансирования и временных ресурсов может привести к упрощению модели, что скажется на её точности. В этой связи полезно проводить пилотные тесты на небольших масштабах, чтобы оценить ресурсы и решить, какие аспекты можно упростить или автоматизировать.

Дополнительным барьером является высокий порог входа для специалистов. Успешное применение АОМ требует опыта в моделировании, анализе данных и программировании, и для большинства компаний поиск таких специалистов представляет собой вызов. Команда может столкнуться с ошибками в моделировании, если не обладает достаточной квалификацией, что повлияет на результаты. Чтобы этого избежать, рекомендуется инвестировать в обучение сотрудников или привлекать внешних консультантов на ранних этапах, а также использовать программные решения, которые упрощают процесс АОМ.

Ключевой вызов для внедрения АОМ заключается в сложности проверки и калибровки моделей. Динамичные и многослойные взаимодействия агентов затрудняют проверку корректности моделей, особенно если они предполагают большое количество различных факторов и сложные сценарии взаимодействий. Ошибки на этапе моделирования могут вызвать снижение точности прогнозов и привести к ошибочным решениям, поэтому рекомендуется верифицировать модель на каждом этапе разработки, тестируя её на реальных данных. Метод анализа чувствительности также помогает проверить поведение модели на случайных изменениях параметров и отладить её.

Также интеграция с существующими системами компании может оказаться непростой задачей. У многих компаний есть устаревшие системы, плохо совместимые с новыми технологиями [6]. Неполная интеграция может привести к ошибкам и искажению данных, что затруднит использование модели в реальных условиях. В таких ситуациях важно внедрять АОМ постепенно, с участием IT-специалистов, которые понимают особенности АОМ и способны интегрировать их с текущей архитектурой. Также можно рассмотреть возможность использования платформ с уже готовыми модулями для интеграции.

Масштабируемость агент-ориентированных моделей также может вызывать трудности, особенно если количество агентов или объем данных увеличиваются. При этом вычислительная нагрузка возрастает, что снижает производительность модели, затрудняя её использование в условиях реального времени. В ответ на это можно использовать облачные и распределенные вычисления, которые позволяют обрабатывать больше данных и обеспечивать масштабируемость по мере необходимости.

Высокие начальные затраты и неопределённость окупаемости также становятся барьером для внедрения АОМ. Создание и настройка модели, закупка программного обеспечения и обучение требуют существенных инвестиций, и многие компании сталкиваются с неопределённостью относительно того, когда они окупятся. Прежде чем начинать внедрение, следует провести анализ экономической эффективности и взвесить все плюсы и минусы, оценить окупаемость и потенциальную выгоду, чтобы избежать неоправданных расходов. Оптимальный вариант для многих компаний — начинать с пилотных проектов.

Недостаточная гибкость в изменяющихся условиях также является ограничением для АОМ. При резких изменениях на рынке, появлении новых условий и законодательных требований модели, основанные на статических правилах поведения агентов, не успевают адаптироваться. Чтобы повысить адаптивность, многие компании начинают комбинировать АОМ с методами машинного обучения, что позволяет моделям быстрее реагировать на изменения внешней среды.

Наконец, из-за сложности агент-ориентированных моделей интерпретация их результатов может стать затруднительной для менеджмента. Динамичные и многоуровневые взаимодействия агентов создают сложности при анализе причинно-следственных связей. В этих случаях помогает создание отчетов и визуализация данных, которые разъясняют поведение модели и ключевые зависимости, делая результаты доступными и понятными для пользователей.

Итак, риски и барьеры внедрения агент-ориентированного моделирования в бизнесе могут стать серьёзным препятствием на пути к его успешной реализации. Однако осведомленность о потенциальных проблемах и проактивное планирование их преодоления помогают повысить шансы на успех. Предварительное тестирование, инвестиции в обучение и грамотная настройка процесса верификации и интеграции могут существенно снизить вероятность ошибок и сделать агент-ориентированное моделирование мощным инструментом для принятия решений в сложных бизнес-средах.

Примеры успешных внедрений АОМ в других отраслях. Для лучшего понимания применения агент-ориентированного моделирования, рассмотрим успешные примеры его использования в различных отраслях за пределами традиционных бизнес-задач.

Экология и управление природными ресурсами. Агент-ориентированное моделирование активно применяется для управления и сохранения экосистем, поскольку оно позволяет моделировать взаимодействия между различными видами и их средой обитания. Например:

Управление рыболовством: АОМ используется для моделирования поведения рыбаков и рыбных запасов, чтобы понять, как различные уровни вылова влияют на экосистему и устойчивость рыбных популяций.

Пожарный менеджмент: АОМ позволяет моделировать распространение лесных пожаров и поведение пожарных бригад, что помогает оптимизировать план реагирования и минимизировать ущерб.

В здравоохранении АОМ используется для моделирования распространения инфекционных заболеваний, а также для управления медицинскими ресурсами:

Эпидемиология: модели распространения инфекций могут учитывать поведение и взаимодействия людей, что помогает предсказывать, как быстро будет распространяться заболевание, и определять эффективные стратегии вмешательства.

Оптимизация госпитализации: АОМ помогает моделировать потоки пациентов, потребность в медицинском персонале и оборудование в больницах. Например, такие модели помогают управлять ресурсами в условиях пандемии, минимизируя нагрузку на медучреждения.

При рассмотрении управления городским транспортом агент-ориентированные модели могут моделировать поведение участников дорожного движения для оптимизации транспортных потоков и улучшения городской инфраструктуры:

Транспортное планирование: АОМ помогает анализировать транспортные потоки, поведение водителей и пешеходов. Такие модели используются для проектирования дорог, парковок и маршрутов общественного транспорта, что позволяет снизить загруженность и улучшить транспортные потоки.

Симуляции движения в реальном времени: в некоторых городах АОМ применяется для создания симуляций в реальном времени, что помогает улучшить планирование и реагирование на дорожные ситуации, такие как аварии и дорожные работы.

В образовании и социальных науках АОМ также используется для изучения социальных процессов, таких как поведение учеников или динамика групп в образовательных системах:

Симуляция учебных процессов: АОМ позволяет моделировать процесс обучения с учетом взаимодействий между учениками, учителями и учебными материалами. Это помогает адаптировать образовательные программы и оценить, как различные методы обучения влияют на успеваемость.

Моделирование социальных взаимодействий: В социальных науках АОМ применяется для моделирования взаимодействий между группами населения, что помогает исследовать процессы формирования социальных норм, распространения информации и других социальных феноменов.

В энергетике АОМ используется для моделирования поведения потребителей энергии, работы генераторов и распределительных сетей:

Оптимизация энергосистем: АОМ помогает моделировать спрос и распределение энергии между потребителями и поставщиками, что позволяет оптимизировать распределение ресурсов и минимизировать издержки.

Моделирование потребления энергии: Агент-ориентированные модели могут прогнозировать поведение потребителей, что полезно при внедрении программ энергосбережения и переходе к возобновляемым источникам энергии.

Эти примеры показывают, что АОМ может применяться в разнообразных сферах для решения сложных задач, связанных с взаимодействием множества участников. Применение агент-ориентированного моделирования выходит за рамки традиционного бизнеса и становится ценным инструментом для исследования и управления сложными системами, что подтверждает его универсальность и потенциальную пользу в различных отраслях.

Будущее агент-ориентированного моделирования. С развитием технологий и увеличением объемов данных агент-ориентированное моделирование будет продолжать эволюционировать. Ожидается, что:

- Вырастет интеграция с искусственным интеллектом, то есть АОМ будет все чаще сочетаться с методами машинного обучения, что позволит улучшить адаптивность и предсказательные возможности моделей;
- Расширится область применения - АОМ найдет свое применение не только в бизнесе, но и в других сферах, таких как экология, здравоохранение и социальные науки, что позволит решать более сложные задачи;
- Упростится разработка моделей: появление новых инструментов и платформ для разработки АОМ облегчит процесс создания и верификации моделей, делая их доступными для более широкого круга специалистов.

Агент-ориентированное моделирование представляет собой важный инструмент для принятия решений в бизнесе, позволяя моделировать сложные взаимодействия и предсказывать последствия различных действий. Его успешное применение в управлении цепочками поставок, маркетинге и финансовых рынках подтверждает его эффективность.

Для компаний, стремящихся внедрить АОМ, рекомендуется:

1. Инвестировать в обучение: обучать сотрудников методам АОМ и использованию соответствующих инструментов.
2. Развивать внутренние компетенции: создавать команды, обладающие опытом в области моделирования и анализа данных.
3. Проводить эксперименты: начинать с небольших проектов, чтобы протестировать АОМ и оценить его влияние на бизнес-процессы.

Выводы. Таким образом, агент-ориентированное моделирование становится ключевым элементом в арсенале инструментов для принятия обоснованных и эффективных решений в условиях быстро меняющегося бизнес-окружения.

Агент-ориентированное моделирование становится значимым инструментом для решения бизнес-задач, таких как управление цепочками поставок, маркетинг и финансовое прогнозирование. Благодаря гибкости и способности моделировать различные сценарии АОМ позволяет адаптироваться к изменениям рынка и повышать качество решений. Однако успешное внедрение требует квалификации специалистов и ресурсов. С развитием технологий АОМ будет все чаще сочетаться с искусственным интеллектом и машинным обучением, что расширит его адаптивность и точность, открывая новые возможности для бизнеса и других отраслей [7].

Данная статья подчеркивает актуальность и значимость агент-ориентированного моделирования как инструмента для принятия решений в бизнесе. Предложенные рекомендации и примеры успешного применения АОМ могут послужить основой для дальнейших исследований, а также практического применения в различных отраслях, способствуя повышению эффективности и конкурентоспособности организаций.

Список литературы

1. Батанов А.А., Клочек А.М. Анализ применения агент-ориентированного моделирования к рассмотрению взаимодействия когнитивно информационных сообщений в форматах экстранет II и Web III // «Социально-гуманитарные проблемы образования и профессиональной самореализации «Социальный инженер-2022». Москва, 2022.
2. Грейди Бутч Объектно-ориентированный анализ. М.: Издательский дом Williams, 2019. 720 с.
3. Дерюгина Е., Пономаренко А., Рожкова А. Когда оценки кредитных разрывов являются достоверными? // Серия докладов об экономических исследованиях Банка России, № 34, 2018.
4. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. Агент-ориентированные модели как инструмент апробации управленческих решений. 2016.
5. Мордвинов В.А., Романченко А.Е., Ткаченко Д.И. Лекционные материалы по дисциплине: "Информационно-управляющие системы" учебно-методическое пособие для студентов бакалавриата. М.: РТУ МИРЭА, 2021. 146 с.
6. Чернов Е.А., Садчиков Н.Д. Оптимизация производственного процесса приборостроительного бюро с использованием математического моделирования в мобильном приложении // Научно-технический вестник Поволжья, 2024. №6. С. 198-201.
7. Пономаренко А., Селезнев С., Хабибуллин Р. Прогнозирование последствий накопления международных резервов при помощи агентной модели // Банк России. Сер. докладов об экономических исследованиях, № 37, 2018.

Клочек Алексей Михайлович, магистр, klocheka@mail.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

Садчиков Никита Дмитриевич, магистр, sadchikov.nikita2003@mail.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

ANALYSIS OF THE IMPACT OF AGENT-BASED MODELING ON BUSINESS DECISION-MAKING

A.M. Klochek, N.D. Sadchikov

The article discusses the main characteristics of AOM, its advantages, limitations, as well as specific business applications such as supply chain management, marketing and financial markets. In addition to analyzing the advantages and disadvantages of this method, recommendations are proposed for its implementation and development in companies to improve decision-making efficiency and reduce business risks.

Key words: agent-based modeling, decision making, supply chain management, marketing, financial markets, optimization, business modeling.

Kilochek Alexey Mikhailovich, master, klocheka@mail.ru, Russia, Moscow, Russian Technological University of MIREA,

Sadchikov Nikita Dmitrievich, master, sadchikov.nikita2003@mail.ru, Russia, Moscow, Russian Technological University MIREA

УДК 004.222.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-695-696

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ В ПАМЯТИ ЭВМ ЗНАЧЕНИЙ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ФОРМЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЧИСЕЛ С ПЛАВАЮЩЕЙ ТОЧКОЙ СОГЛАСНО СТАНДАРТУ IEEE 754

К.Е. Никкель, А.А. Сосунов, Л.Э. Петросян

В статье рассматриваются основные вопросы, связанные с особенностями хранения и использования чисел с плавающей запятой в памяти ЭВМ (электронно-вычислительных машин), соответствующие тематике таких чисел математические модели и алгоритмы некоторых операций, характерные для вышеуказанных чисел. Описывается суть чисел с плавающей запятой, их математическая и аппаратная структура. Рассматриваются вопросы нормализации и преобразования чисел для приведения их к виду, соответствующему требованиям основного регламентирующего стандарта, описывающего вопросы хранения таких чисел в памяти ЭВМ. Приводятся примеры выполнения основных арифметических действий над числами в стандарте IEEE 754. Многие тезисы и утверждения иллюстрируются и подтверждаются программно.

Ключевые слова: число с плавающей точкой, мантисса, порядок, IEEE 754, форма представления, точность, разрядная сетка.

В подавляющем большинстве современных высокоуровневых языках программирования есть примитивные типы данных, отвечающие за кодирование и хранение чисел разного вида. Эти числа могут быть самыми разными: натуральными, целыми, дробными, положительными, отрицательными и т.д. Для того чтобы максимально эффективно и в полной мере реализовать математическую иерархию множеств чисел, были придуманы различные типы данных. Например, в языке программирования Java для этих целей есть специальные классы-оболочки (wrap-

per classes): Integer, Double, Float и др. В языке C++ это устроено практически так же (табл. 1), разве что присутствует возможность (чего нет в языке Java) добавлять префикс unsigned, что может дать некоторые преимущества, в частности, расширить диапазон представления. Тип данных – это, по сути, одна из возможных форм представления числа. Форма представления числа – вариант распределения разрядов в имеющейся разрядной сетке между отдельными полями. Такие поля имеют определённые функциональные назначения. Ключевым объектом в классификации типов данных является положение десятичного разделителя, то есть точки.

Таблица 1

Примеры типов данных в языке программирования C++

№	Тип данных	Знак	Разряды	Диапазон
1	2	3	4	5
1	2	3	4	5
1	unsigned char	без знака	1 байт	[0;255]
2	unsigned short int	без знака	2 байта	[0;65535]
3	unsigned int	без знака	4 байта	[0;4294967295]
4	unsigned long	без знака	8 байт	[0;18446744073709551615]
5	short int	со знаком	2 байта	[-32768;32767]
6	int	со знаком	4 байта	[-2147483648;2147483647]

Когда точка, отделяющая целую часть числа от дробной, фиксирована, особых проблем с определением того, какие числа кодируются в зависимости от положения точки, как правило, не возникает. Если точка находится справа от младшего разряда, то можно закодировать положительные числа в диапазоне $0 \le X \le 2^n - 1$ или числа со знаком в диапазоне $1 - 2^{n-1} \le X \le 2^{n-1} - 1$ в сочетании с прямым кодом и в диапазоне $-2^{n-1} \le X \le 2^{n-1} - 1$ в сочетании с дополнительным кодом (при этом старший разряд является знаковым, «0» соответствует знаку «+», а «1» соответствует знаку «−»; n – количество разрядов). Такой формат широко используется и поддерживается разнообразными типами данных в языках программирования (табл. 1). Фиксация точки слева от младшего разряда – это теоретический случай, использование такого формата возможно только в ЭВМ специального назначения[1]. Если точка фиксирована в середине, то диапазоны представления выглядят так: $0 \le X \le 2^k - 2^{-m}$ - для чисел без знака (только положительные) и $0 \le |X| \le 2^p - 2^{-r}$, где k и p – количество разрядов для целой части, m и r – для дробной.

Три рассмотренных выше случая положения десятичного разделителя в классификации форм представления чисел относятся к одной большой категории – формы представления чисел с фиксированной точкой. А вот форма представления чисел с плавающей точкой – это совсем другая категория. Этот случай является более сложным и порождает некоторые неоднозначности, которые нужно урегулировать. Все спорные вопросы решает международный стандарт IEEE 754, который в настоящее время выпущен в трёх редакциях – от 1985, 2008 и 2019 г.[2,8]. Этот стандарт описывает правила и принципы представления чисел с плавающей точкой. Он используется в программных и аппаратных реализациях арифметических действий. Некоторые вопросы, регулируемые стандартом IEEE 754-1985[3]:

− Представление нормализованных чисел с плавающей точкой;
− Представление ненормализованных чисел с плавающей точкой;
− Представление других специальных величин (нули, бесконечности и NaN);
− Четыре режима округления.

Способы округления чисел по стандарту IEEE 754[4]:

− Округление к ближайшему целому;
− Округление к нулю;
− Округление к +∞;
− Округление к -∞.

Новый стандарт 2008 года призван заменить устаревший IEEE 754-1985. Из старого стандарта сохранили все двоичные форматы, но также добавили три новых (один бинарный и два десятичных). Для соответствия текущему стандарту реализация должна включать хотя бы один из основных форматов[5].

Множество разрядов в разрядной сетке делится на следующие поля (рис. 1).

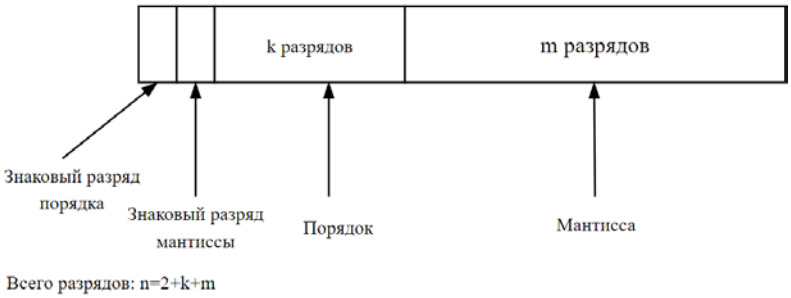


Рис. 1. Типовая структура полей числа с плавающей точкой

В этом случае значение числа представляется как произведение мантиссы и характеристической части числа (характеристическая часть – основание системы счисления – как правило, 2 – возведённое в степень, равную порядку числа) (см. формулу 1):

$$X = \pm M * 2^{\pm(2^K - 1)}, \quad (1)$$

где X – представляемое число; M – мантисса, $M \in [0;1)$; K – порядок.

При этом диапазон представления чисел описывается формулой 2:

$$0 \le |X| \le (1 - 2^{-m}) * 2^{2^{k-1}}, \quad (2)$$

где m – количество бит мантиссы; k – количество бит порядка.

Не сложно заметить, что для чисел с плавающей точкой возникает проблема неоднозначности представления: есть возможность умножать/делить мантиссу на основание системы счисления, соответственно меняя показатель степени[6]. Например, следующая строчка верна для десятичной системы счисления:

$$0{,}121 * 10^6 = 1{,}21 * 10^5 = \ldots = 12100 * 10^1 = 121000 * 10^0 = 1210000 * 10^{-1} = 121000_{10}$$

То же явление, но для двоичной системы счисления (другое число):

$$0{,}110101 * 2^6 = 1{,}10101 * 2^5 = \ldots = 11010{,}1 * 2^1 = 110101 * 2^0 = 1101010 * 2^{-1} = 53_{10}$$

Строчка выше, записанная с двоичными значениями в показателях:

$$0{,}110101 * 2^{110} = 1{,}10101 * 2^{101} = \ldots = 11010{,}1 * 2^1 = 110101 * 2^0 = 1101010 * 2^{-1} = 53_{10}$$

Чтобы ограничить множественность вариантов представления одного и того же числа, договорились использовать нормализованный вид. Выделенное жирным – нормализованная форма записи (но не с точки зрения стандарта IEEE 754). Число считается нормализованным, если в старшем разряде после запятой стоит значащая цифра (в прямом коде двоичной системы счисления это 1), целая часть при этом должна равняться нулю. Если число не соответствует условиям выше, оно называется ненормализованным, денормализованным или субнормальным.

Особенность размещения разрядов нормализованных чисел в разрядной сетке состоит в том, что 0 как целая часть явным образом не хранится, т.е. предполагается, что в нормализованных числах целая часть всегда равна нулю, поэтому специального разряда для её хранения выделять не нужно, что даёт один дополнительный свободный разряд и, как следствие, увеличивает диапазон для соответствующего типа (см. рис. 2).



Рис. 2. Пример заполнения разрядной сетки для хранения нормализованного числа 0,000101

Рассмотрим несколько простых правил, с помощью которых нужно выполнять арифметические операции над числами с плавающей точкой. Сразу стоит оговорить тот момент, что представленные здесь правила немного отличаются от правил стандарта IEEE 754, т.к. мы пока что рассматриваем общую идею, а не сам стандарт.

При сложении или вычитании чисел с плавающей точкой первым делом нужно произвести выравнивание порядков, а только потом сложение или вычитание мантисс. Пояснение: порядок меньшего по модулю числа увеличивается в сторону порядка большего по модулю числа, а мантисса меньшего по модулю числа сдвигается на соответствующее количество порядков вправо, т.е. уменьшается в соответствующее количество раз. Рассмотрим небольшие примеры сложения и вычитания.

Пусть даны два нормализованных двоичных числа: $0{,}1 * 2^5$ и $0{,}1 * 2^3$ (рис. 3). Произвести сложение и вычитание. Для начала произведём выравнивание порядков: $0{,}1 * 2^3 = 0{,}001 * 2^5$. Далее производим сложение и вычитание по правилам. В конце любых арифметических операций при необходимости производится нормализация результата. В случае вычитания результат нужно нормализировать, в случае сложения – нет.

$$\begin{array}{r} 0{,}100 * 2^5 \\ +\,0{,}001 * 2^5 \\ \hline 0{,}101 * 2^5 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 0{,}100 * 2^5 \\ -\,0{,}001 * 2^5 \\ \hline 0{,}011 * 2^5 \end{array} = 0{,}11 * 2^4$$

Рис. 3. Пример осуществления операций сложения и вычитания

При умножении чисел с плавающей точкой порядки складываются, а мантиссы перемножаются. При делении из порядка делимого вычитается порядок делителя, мантиссы – делятся. Знак мантиссы, который получится в результате умножения или деления чисел определяется как результат операции «исключающее или» над знаками 1-го и 2-го аргументов. Рассмотрим пример с теми же числами (рис. 4):

$$\begin{array}{r} 0{,}1 * 2^5 \\ *\ 0{,}1 * 2^3 \\ \hline 0{,}01 * 2^8 = 0{,}1 * 2^7 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 0{,}1 * 2^5 \\ /\ 0{,}1 * 2^3 \\ \hline 1 * 2^2 = 0{,}1 * 2^3 \end{array}$$

Рис. 4. Пример осуществления операций умножения и деления

В настоящее время в стандарт IEEE 754 включено 5 форматов двоичной плавающей запятой, 3 из которых – основные. Формат восьмикратной точности используется крайне редко. Например, в настоящий момент не существует известной аппаратной реализации такой точности[7]. Формат половинной точности, как правило, в настоящее время тоже не используется, однако этот формат очень удобно рассматривать в учебных целях из-за его краткости.

Отличие одного формата от другого главным образом заключено в разном количестве бит, выделяемых для кодирования чисел. Для того чтобы максимально эффективно разобраться в различиях, выведем некоторые формулы, зависящие от величины n, где n – количество бит, выделяемых для кодирования чисел в конкретном формате. Так как в современных языках программирования половинная точность практически не используется, а самый «маленький» формат – binary32, то на практике справедливо: $n \vdots 32$ (формат половинный точности сюда не относится, так как это скорее теоретический случай):

− Точность (количество битов, отданное под хранение мантиссы, включая ту целую часть, которая хранится неявно):

− Количество бит, отданное для хранения «хвоста» мантиссы (мантиссы без подразумеваемой целой части) на один разряд меньше точности: $n - (4 * \log_2 n) + 13$;

− Количество бит для хранения знака не зависит от формата и всегда равно 1;

− Количество бит для хранения порядка: $(4 * \log_2 n) + 12$;

− Согласно стандарту IEEE 754, мы не храним знак порядка, т.к. порядок всегда должен быть неотрицательным. Выполнение этого условия обеспечивается использованием симметричного кода со смещением при записи порядка. Такой подход упрощает выполнение операций сравнения и выравнивания порядков. Заметим, что истинный порядок может быть как положительным, так и отрицательным. Смещённый порядок, согласно стандарту, всегда неотрицательный. В таком подходе хранения порядка числа вводится понятие сдвиг или смещение, эта величина вычисляется по формуле: $2^{n-1} - 1$.

Ниже в табличной форме представлена информация и параметры, используемые для кодирования для каждого формата (см. табл. 2 и рис.5).

Таблица 2

Параметры двоичных форматов стандарта IEEE 754

Параметр	Формат стандарта IEEE-754-2008				
	binary16	binary32	binary64	binary128	binary256
Полное название	Половинная точность	Одинарная точность	Двойная точность	Четырёхкратная точность	Восьмикратная точность
Статус	Не основной	Основной	Основной	Основной	Не основной
Объём занимаемой памяти (бит)	16	32	64	128	256
Тип данных в языке C++	-	float	double	long double	-
Точность в битах	11	24	53	113	237
Количество бит для хранения хвоста мантиссы	10	23	52	112	236
Количество бит для хранения знака	1	1	1	1	1
Количество бит для хранения порядка	5	8	11	15	19
Сдвиг, смещение	15	127	1023	16383	262 143

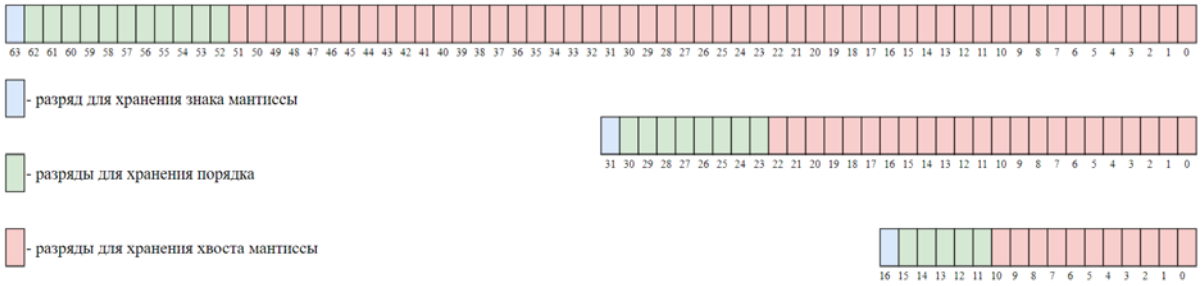


Рис. 5. Пример разрядных сеток для форматов binary64, binary 32, binary16

Реализация нормализации мантиссы в стандарте отличается от общей идеи. Сделано это для расширения диапазона представления чисел. Стандарт определяет нормализованную мантиссу следующим образом: она состоит из неявной целой части, которая всегда равна 1 (при этом не хранится в памяти явно), двоичного разделителя и остальных разрядов. При этом модуль нормализованной мантиссы охватывает диапазон $[1;2)$. Мантисса хранится в прямом коде. Рассмотрим мотив использования такого механизма.

В соответствии с классическим понятием нормализации, единица справа от точки есть всегда (см. рис. 6):

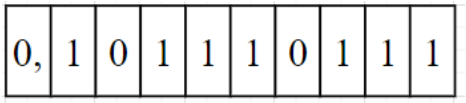


Рис. 6. Классическое нормализованное число

Поэтому мы могли бы умножить данное число на 2 (основание системы счисления, в которой работаем), т.е. фактически перенести запятую вправо на 1 разряд, тем самым сделав число с целой частью, равной 1. В таком случае у нас освободится младший разряд разрядной сетки для принятия какого-то нового значения (показано красным на рис. 7).

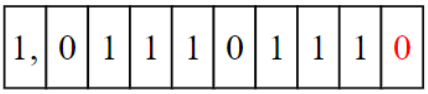


Рис. 7. Принятие целой части равной 1

У нормализованного числа целая часть всегда равна 1, поэтому мы могли бы её не хранить в памяти явно, а просто подразумевать её наличие, за счёт этого можно выиграть 2 бита в записи числа (выделены красным на рис. 8).

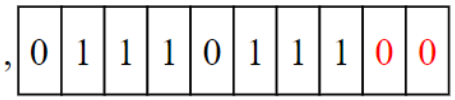


Рис. 8. Отказ от хранения целой части

Если число не может быть сохранено в нормализованном виде, т.к. в рассматриваемом формате не хватает для этого разрядов порядка, то, возможно, это число можно сохранить в ненормализованном виде. Стандарт определяет ненормализованную мантиссу следующим образом: она состоит из неявной целой части, которая всегда равна 0 (на хранится в памяти), двоичного разделителя и остальных разрядов. При этом мантисса хранится в прямом коде. Таким образом, модуль ненормализованной мантиссы охватывает диапазон чисел $[0;1)$. В этом случае выигрываем 1 бит в записи числа. Ниже на рис. 9 представлен механизм, о котором идёт речь. Сверху - мантисса классического нормализованного числа, а снизу продемонстрирован отказ от хранения целой части.

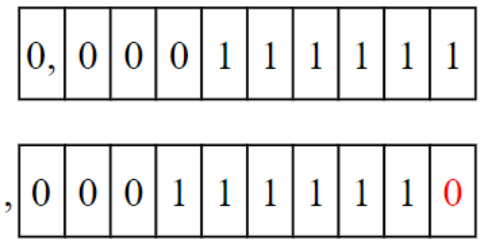


Рис. 9. Представление мантиссы для ненормализованных чисел

Помимо стандартных чисел, дело может коснуться некоторых специальных случаев: нуля, бесконечности и NaN (not a number – не число). Таким образом, в рамках стандарта IEEE 754 существует 5 категорий отображаемых значений (см. табл. 3):

1) Нормализованное число
2) Ненормализованное число
3) Ноль
4) Бесконечность
5) Не число

Таблица 3

Категории отображаемых значений с учётом специальных случаев

Тип числа	Знак	Вид порядка	Вид мантиссы
Нормализованное число	±	Не 0 и не все единицы	Любой набор битов
Ненормализованное число	±	0	Любой ненулевой набор битов
Ноль	±	0	0
Бесконечность	±	Все единицы (max)	0
Не число	±	Все единицы (max)	Любой ненулевой набор битов

К сожалению, может произойти ситуация, когда число не помещается в разрядную сетку. В случае если мы пытаемся сохранить n младших разрядов, старший разряд может выходить из разрядной сетки слева, тогда мы теряем значение из числа, равное 2^{n+1} (см. рис. 10):

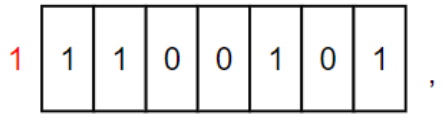


Рис. 10. Переполнение разрядной сетки

Ещё один случай – число не помещается в разрядную сетку, но мы пытаемся сохранить n старших разрядов числа, при этом младший разряд выходит из разрядной сетки справа. Происходит потеря точности примерно в 2 раза (см. рис. 11).

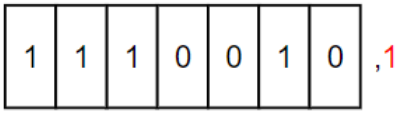


Рис. 11. Потеря точности в 2 раза

Если n старших разрядов нулевые, а последующие разряды, выходящие за пределы разрядной сетки, ненулевые, то компьютер примет это ненулевое число за 0, такая ситуация называется машинный ноль (см. рис. 12):

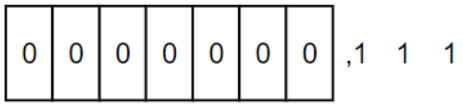


Рис. 12. Машинный ноль

Машинный ноль – частный случай, иллюстрирующий проблему непрерывности представления чисел в форматах стандарта IEEE 754. Такая проблема возникает из-за того, что размеры разрядной сетки ограничены. Иначе говоря, машинный ноль - числовое значение с таким отрицательным порядком, которое воспринимается машиной как ноль. Например, для числа одинарной точности машинный ноль будет лежать в диапазоне от -2^{-150} до 2^{-150}. Таким образом, мы не сможем сохранить в память ЭВМ какие угодно числа, но мы сможем записывать числа с некоторым шагом. Рассмотрим данную ситуацию на примере двух чисел в формате половинной точности. Пусть даны два числа: 1_{10} и $1{,}0009765625_{10}$. В двоичной системе счисления: $1_{10} = 1_2$ и $1{,}0009765625_{10} = 1{,}0000000001_2$. В разрядных сетках представление этих чисел будет выглядеть так (см. рис. 13).

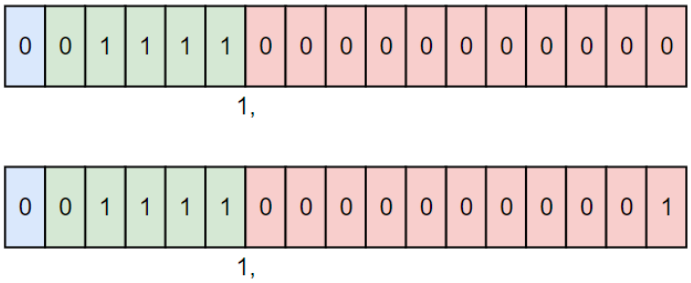


Рис. 13. Представления чисел в формате половинной точности

Получается, что числа в диапазоне $1_{10} < X < 1{,}0009765625_{10}$ не получится закодировать в рамках формата половинной точности стандарта IEEE 754. Аналогичные проблемы с нарушением непрерывности представления чисел, безусловно, имеются и в других форматах стандарта IEEE 754.

Выводы. Несмотря на то, что стандарт существует довольно давно и имеет широкое использование, в нём всё же есть некоторые неточности. Он постоянно пересматривается и уточняется. Последняя версия IEEE 754-2019 вышла в июле 2019 года. Ввиду довольно большой скорости изменения технологий в построении компьютеров и организации процессорной архитектуры, стандарт и дальше будет подвергаться изменениям и доработкам. Более того, у стандарта IEEE 754 есть в некотором роде конкурент, речь идёт о ISO/IEC 60559, который в целом повторяет содержание IEEE 754. Следующая версия IEEE 754 планируется к выпуску в 2028 году.

Таким образом, с уверенностью можно сказать, что стандарт IEEE 754 в целом весьма хорош собой, он зарекомендовал себя уже давно. Но, тем не менее, это всего лишь рекомендация, нет никаких строгих обязательств в том, чтобы его использовать всегда и везде. Существует огромное количество специализированных ЭВМ, направленных на решение конкретных, узкопрофильных задач, функциональность которых вовсе не обязательно должна соответствовать функциональности по хранению и обработке чисел в современных компьютерах. В качестве примеров можно привести различные целочисленные счётчики, банкоматы, системы учёта дорожного трафика и т.п.

В рамках рассмотрения данного стандарта в контексте его улучшения можно предложить ряд следующих изменений. Первое: избавление от знаков нуля. Как мы уже убеждались выше, стандарт предусматривает положительный и отрицательный ноль. С точки зрения математики это не совсем корректно, было бы разумнее отдать эти последовательности битов под какие-то другие числа, а для нуля придумать что-то новое, чтобы избежать путаницы при изучении стандарта и обработки чисел. Второе: глобальная проблема потери точности – эта ситуация происходит очень часто при работы с любыми типами. Решить эту проблему с ходу вряд ли получится, так как в сущности стандарт и построен на идее поиска компромисса между точностью и диапазоном представления. Возможно, чтобы избежать эту проблему, потребуется совершенно новый подход, кардинально отличающийся от подхода, реализованного в стандарте IEEE 754.

Список литературы

1. Иевлев В.И., Филиппов Г.А. Качество и надежность электронной компонентной базы ЭВМ специального назначения: учебное пособие. 2013.

2. Brain M. et al. An automatable formal semantics for IEEE-754 floating-point arithmetic // 2015 IEEE 22nd Symposium on Computer Arithmetic. IEEE, 2015. С. 160-167.
3. Грошев А., Закляков П. Информатика. Litres, 2022.
4. Зыков А.Г., Поляков В.И. Арифметические основы ЭВМ. СПб: Университет ИТМО. 2016.
5. Kahan W. IEEE standard 754 for binary floating-point arithmetic // Lecture Notes on the Status of IEEE. 1996. Т. 754. №. 94720-1776. С. 11.
6. Холодилов С. Плавающая запятая // RSDN Magazine. 2007. №4. С. 12–14.
7. Бурдинский И.Н. Системы счисления и арифметика ЭВМ. 2014.
8. IEEE 754-2008 [Электронный ресурс] URL: https://web.archive.org/web/20200428043913/https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_754-2008 (дата обращения: 06.11.2024).

Никкель Кирилл Евгеньевич, магистрант, kirnikkel@mail.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА,

Сосунов Андрей Алексеевич, магистрант, sosunov.a.a@edu.mirea.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

Петросян Лусинэ Эдуардовна, канд. экон. наук, доцент, Petrosyan@mirea.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

FEATURES OF USING AND STORING IN COMPUTER MEMORY VALUES CORRESPONDING TO THE FORM OF REPRESENTATION OF FLOATING-POINT NUMBERS ACCORDING TO IEEE 754 STANDARD

K.E. Nikkel, A.A. Sosunov, L.E. Petrosyan

The article considers the main issues related to the features of storing and using floating-point numbers in the memory of computers (electronic computers), mathematical models and algorithms of some operations that are characteristic of the above-mentioned numbers that correspond to the subject of such numbers. The essence of floating-point numbers, their mathematical and hardware structure are described. The issues of normalization and transformation of numbers to bring them to a form that meets the requirements of the main regulatory standard describing the issues of storing such numbers in the memory of a computer are considered. Examples of performing basic arithmetic operations on numbers in the IEEE 754 standard are given. Many theses and statements are illustrated and confirmed by software.
Key words: floating-point number, mantissa, order, IEEE 754, representation form, accuracy, bit grid.

Nikkel Kirill Evgenievich, master's, kirnikkel@mail.ru, Russia, Moscow, Russia, Moscow, Russian University of Technology MIREA,

Sosunov Andrey Alekseevich, master's, sosunov.a.a@edu.mirea.ru, Russia, Moscow, Russia, Moscow, Russian University of Technology MIREA,

Petrosyan Lusine Eduardovna, candidate of economic sciences, docent, Petrosyan@mirea.ru, Russia, Moscow, Russian University of Technology MIREA

УДК 004.43
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-701-702

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИБЛИОТЕК РЕАЛИЗАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА НА ЯЗЫКЕ С++

А.А. Шмаков, М.А. Одиноков, Л.Э. Петросян

В статье содержится краткий обзор библиотек реализации пользовательского интерфейса на языке C++. Рассматриваются наиболее популярные библиотеки: QT, wxWidgets, GTK+, FLTK (Fast, Light Toolkit) и MFC (Microsoft Foundation Classes).
Ключевые слова: сравнительный анализ, анализ, библиотеки, библиотека пользовательского интерфейса, GUI, C++, QT, wxWidgets, GTK+, FLTK, MFC.

Современные приложения требуют интуитивного, отзывчивого и удобного пользовательского интерфейса (GUI). Для создания интерфейсов на языке C++ существует несколько популярных библиотек, среди которых выделяются QT, wxWidgets, GTK+, FLTK (Fast, Light Toolkit) и MFC (Microsoft Foundation Classes).

Эти библиотеки позволяют разрабатывать кроссплатформенные приложения для Windows, macOS и Linux. В данной статье представлен сравнительный анализ библиотек QT и wxWidgets с точки зрения их архитектуры, возможностей и эффективности.

Материал исследования. QT. QT – это библиотека для разработки кроссплатформенных приложений с графическим интерфейсом, а также консольных приложений [1]. Она поддерживает широкий спектр функций, включая работу с сетью, базами данных, мультимедиа и многими другими аспектами разработки. QT использует

сигнально-слотовую систему для обработки событий, что обеспечивает простоту в управлении сложными взаимодействиями между объектами. Кроме того, QT предлагает интегрированные инструменты для дизайна интерфейсов, такие как Qt Designer, который упрощает процесс разработки GUI.

Библиотека может использоваться не только при разработке на языке C++, но и в других языках программирования, таких как: Python, C#, Java, PHP и т.д.

Основные характеристики QT:

Сигнально-слотовая система, облегчающая связь между объектами.

Наличие встроенных инструментов для разработки интерфейсов.

Поддержка современных подходов, таких как QML (Qt Meta Language или Qt Modeling Language) и Qt Quick для создания современных пользовательских интерфейсов.

Богатая экосистема библиотек и модулей.

wxWidgets. wxWidgets – это библиотека с открытым исходным кодом, предоставляющая возможность разрабатывать кроссплатформенные приложения с использованием нативных элементов интерфейса операционных систем [2]. Она приближена к традиционному объектно-ориентированному программированию без использования дополнительных механизмов, таких как сигнально-слотовая система.

В отличие от других мультиплатформенных библиотек, wxWidgets использует API платформы вместо эмуляции графического интерфейса пользователя, что позволяет приложениям выглядеть «родными» на каждой платформе.

Основные характеристики wxWidgets:

Использование нативных компонентов операционной системы для отрисовки интерфейса.

Высокая степень кроссплатформенной совместимости.

Простая структура, которая позволяет быстро освоиться разработчикам, знакомым с объектно-ориентированным программированием.

Широкий набор инструментов для создания GUI, работы с файлами, сетью и базами данных.

GTK+. GTK+ (GIMP Toolkit) — это библиотека с открытым исходным кодом, предназначенная для разработки графических пользовательских интерфейсов, в первую очередь для приложений на платформе Linux, но также поддерживающая другие операционные системы [3]. Первоначально разработанная для обеспечения интерфейса редактора изображений GIMP, она быстро завоевала признание среди разработчиков благодаря своей гибкости и универсальности. GTK+ предоставляет богатый набор виджетов, таких как кнопки, текстовые поля, списки и меню, а также поддерживает сложные макеты с помощью контейнеров.

Одной из ключевых причин популярности GTK+ является его активное сообщество, поддерживающее развитие библиотеки и предлагающее множество ресурсов для программистов. Сообщество активно работает над улучшением производительности и удобства использования, а также над расширением функциональности библиотек через различные плагины и дополнения. Возможность интеграции с другими системами и библиотеками, такими как GStreamer для мультимедийного контента, позволяет разработчикам создавать более сложные и многофункциональные приложения.

Основные характеристики GTK+:

GTK+ не использует нативные элементы интерфейса, а рисует собственные виджеты, что позволяет добиться единого внешнего вида на всех платформах.

Хотя GTK+ написан на C, существуют биндинги для других языков программирования, таких как C++, Python и Ruby.

Библиотека предлагает богатый набор элементов управления, что позволяет легко создавать сложные интерфейсы.

GTK+ поддерживает темизацию с использованием CSS, что позволяет разработчикам легко изменять внешний вид приложений.

FLTK. FLTK (Fast, Light Toolkit) — это легковесная кроссплатформенная библиотека для создания графических пользовательских интерфейсов [4]. Она предоставляет разработчикам простые и быстрые инструменты для создания приложений с минимальными затратами на ресурсы. FLTK в первую очередь нацелен на разработчиков, которым важна высокая производительность и быстрота разработки.

Несмотря на свою легковесность, библиотека предоставляет достаточный набор инструментов для создания полноценных графических интерфейсов. Благодаря своей архитектуре, FLTK предлагает быстрый отклик и минимальную загрузку процессора, что особенно важно при разработке программ для устройств с ограниченными вычислительными возможностями. Разработчики ценят FLTK за его прозрачность, гибкость и широкие возможности настройки, что делает его удобным выбором как для коммерческих, так и для открытых проектов.

Основные характеристики FLTK:

FLTK разрабатывался с целью минимизации размера библиотеки и оптимизации производительности, что делает его идеальным для встроенных систем и приложений с ограниченными ресурсами.

Библиотека поддерживает различные платформы, включая Windows, macOS и Linux.

FLTK предлагает интуитивно понятный интерфейс и простые в использовании виджеты, что позволяет разработчикам быстро создавать прототипы приложений.

FLTK имеет встроенную поддержку OpenGL, что делает его подходящим для графических приложений и игр.

MFC. MFC (Microsoft Foundation Classes) – это набор классических библиотек, разработанных Microsoft, который предоставляет объектно-ориентированные обертки для Windows API [5]. MFC используется в основном для разработки приложений, работающих на платформе Windows, и имеет глубинную интеграцию с ОС.

Библиотека ориентирована на разработчиков, которые нуждаются в высокой производительности и нативном взаимодействии с системой, а также в доступе к низкоуровневым ресурсам Windows. Несмотря на свою зрелость, MFC продолжает использоваться в корпоративных проектах и является надежным решением для тех, кто работает с приложениями для Windows.

Основные характеристики MFC:

MFC предлагает богатый набор инструментов и классов для работы с .NET и Windows API, что позволяет разрабатывать приложения с нативным поведением и внешним видом.

В MFC имеются мощные инструменты для создания пользовательских диалоговых окон и интерфейсов, что делает использование данной библиотеки удобным для разработчиков, работающих с Windows.

MFC идеальным образом интегрируется с Visual Studio, что позволяет разработчикам использовать мощный инструментальный набор для проектирования и отладки приложений.

Результаты исследования. В приложении А представлено сравнение библиотек реализации пользовательского интерфейса. На основе анализа таблицы можно выделить основные преимущества каждой из библиотек: Qt – обладает высокой производительностью и гибкостью, поддерживает широкую платформенную совместимость, wxWidgets – использует нативные виджеты операционных систем, что позволяет достичь производительности, близкой к нативным приложениям, GTK+ – благодаря своей собственной системе управления GUI и мощному инструменту Glade, подходит для создания гибких приложений, FLTK – обеспечивает высокую производительность при минимальном использовании ресурсов, что делает её отличным выбором для легковесных приложений, MFC – показывает высокую производительность на платформах Windows и интеграцию с Visual Studio.

Каждый инструмент имеет свои особенности и преимущества, которые делают его предпочтительным для определённых задач и условий разработки. Однако выбор библиотеки зависит от требований проекта и личных предпочтений разработчика.

Помимо сравнения функциональных возможностей библиотек возможна приблизительная оценка популярности библиотек среди пользователей.

Критериями сравнения популярности библиотек были выбраны:

Количество звезд на Github для репозиториев библиотеки;

Количество упоминаний на Stack Overflow.

Чтобы рассчитать совокупную популярность следует нормализовать данные, высчитать сумму нормализованных показателей и получить коэффициент популярности библиотеки. Собранные данные представлены в таблице 1.

Собранные данные о библиотеках

№	Библиотека	Количество звезд на Github	Количество упоминаний на Stack Overflow
1	Qt	2500 [6]	86334 [10]
2	wxWidgets	6100 [7]	4244 [11]
3	GTK+	1400 [8]	8543 [12]
4	FLTK	1700 [9]	503 [13]
5	MFC	-	13182 [14]

Формула коэффициента популярности:

,

где P – коэффициент популярности библиотеки; N_i – количество звезд на Github для одной библиотеки; N_{max} – максимальное количество звезд на Github среди всех библиотек; K_i – количество упоминаний на Stack Overflow для одной библиотеки; K_{max} – максимальное количество упоминаний на Stack Overflow среди всех библиотек.

В результате расчетов были получены следующие коэффициенты популярности:

Qt: 1,41;

wxWidgets: 1,049;

GTK+: 0,329;

FLTK: 0,2858;

MFC: 0,153.

На основе расчетов можно сделать вывод, что наиболее популярной среди пользователей является библиотека Qt.

Выводы. Результаты анализа показывают, что Qt обладает наиболее широкими возможностями и популярностью благодаря высокой гибкости и кроссплатформенности, в то время как wxWidgets обеспечивает работу с нативными компонентами ОС. GTK+ привлекает своей гибкостью и богатым набором виджетов, а FLTK выгодно отличается минимальными ресурсными затратами. MFC остаётся востребованной для приложений, работающих исключительно на платформе Windows. Итоговые расчеты показывают, что среди рассмотренных библиотек наиболее популярной является Qt.

Список литературы

1. QT Documentation [Электронный ресурс] URL: https://doc.qt.io (дата обращения: 20.09.2024).
2. wxWidgets: Cross-Platform GUI Library [Электронный ресурс] URL: https://wxwidgets.org (дата обращения: 20.09.2024).
3. The GTK Project [Электронный ресурс] URL: https://www.gtk.org (дата обращения: 20.10.2024).
4. FLTK Fast Light Toolkit [Электронный ресурс] URL: https://www.fltk.org (дата обращения: 20.10.2024).
5. MFC Desktop Applications [Электронный ресурс] URL: https://learn.microsoft.com/en-us/cpp/mfc/mfc-desktop-applications?view=msvc-170 (дата обращения: 20.10.2024).
6. Qt GitHub [Электронный ресурс] URL: https://github.com/qt/qtbase (дата обращения: 20.10.2024).
7. wxWidgets GitHub [Электронный ресурс] URL: https://github.com/wxWidgets/wxWidgets (дата обращения: 20.10.2024).
8. GTK+ GitHub [Электронный ресурс] URL: https://github.com/GNOME/gtk (дата обращения: 20.10.2024).
9. FLTK GitHub [Электронный ресурс] URL: https://github.com/fltk/fltk (дата обращения: 20.10.2024).
10. Qt questions stackoverflow [Электронный ресурс] URL: https://stackoverflow.com/questions/tagged/qt (дата обращения: 20.10.2024).

11. wxWidgets questions stackoverflow [Электронный ресурс] URL: https://stackoverflow.com/questions/tagged/wxwidgets (дата обращения: 20.10.2024).
12. GTK+ questions stackoverflow [Электронный ресурс] URL: https://stackoverflow.com/questions/tagged/gtk (дата обращения: 20.10.2024).
13. FLTK questions stackoverflow [Электронный ресурс] URL: https://stackoverflow.com/questions/tagged/fltk (дата обращения: 20.10.2024).
14. MFC questions stackoverflow [Электронный ресурс] URL: https://stackoverflow.com/questions/tagged/mfc (дата обращения: 20.10.2024).
15. GNU General Public License (GPL) [Электронный ресурс] URL: https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html (дата обращения: 20.10.2024).
16. GNU Lesser General Public License (LGPL) [Электронный ресурс] URL: https://www.gnu.org/licenses/lgpl-3.0.html (дата обращения: 20.10.2024).
17. wxWindows Library Licence [Электронный ресурс] URL: https://wxwidgets.org/about/licence (дата обращения: 20.09.2024).

Шмаков Александр Александрович, магистрант, a.shmakov2708@yandex.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА,

Одиноков Максим Александрович, магистрант, odi.max2002@gmail.com, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА,

Петросян Лусинэ Эдуардовна, канд. эконом. наук, доцент, mail@mfmgutu.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

COMPARATIVE ANALYSIS OF USER INTERFACE IMPLEMENTATION LIBRARIES IN C++

A.A. Shmakov, M.A. Odinokov, L.E. Petrosyan

The article provides a brief overview of the libraries for implementing the user interface in the C++ language. The most popular libraries are considered: QT, wxWidgets, GTK+, FLTK (Fast, Light Toolkit) and MFC (Microsoft Foundation Classes).

Key words: comparative analysis, analysis, libraries, user interface library, GUI, C++, QT, wxWidgets, GTK+, FLTK, MFC.

Shmakov Alexander Alexandrovich, undergraduate, a.shmakov2708@yandex.ru, Russia, Moscow, Russian Technological University MIREA,

Odinokov Maxim Alexandrovich, undergraduate, odi.max2002@gmail.com, Russia, Moscow, Russian Technological University MIREA,

Petrosyan Lusine Eduardovna, candidate of economics. sciences, docent, mail@mfmgutu.ru, Russia, Moscow, Russian University of Technology MIREA

УДК 004.45
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-704-705

АНАЛИЗ РОССИЙСКИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ DOCKER-ОБРАЗАМИ

А.С. Потемкин, К.А. Узоров, Л.Э. Петросян

В данной статье представлен обзор российских систем-аналогов DockerHub, для хранения и обработки Docker-образов. Показаны популярные современные разработки в данной области. Произведен сравнительный анализ Российских платформ для хранения и работы с Docker-образами и составлен прогноз роста или уменьшения количества пользователей каждой из них, в случае прекращения работы Docker Hub.

Ключевые слова: Docker-образы, системы контейнеризации, программное обеспечение, российские аналоги, кластеры.

Технологии контейнеризации за последние годы стали ключевым инструментом в разработке, тестировании и развертывании приложений. Одной из важнейших составляющих контейнерной экосистемы является система хранения и работы с Docker-образами. Docker-образы — это легковесные, автономные и исполняемые пакеты, содержащие всё необходимое для запуска приложения: код, библиотеки и зависимости. Разработчики могут создавать программное обеспечение на локальной системе, точно зная, что оно будет работать одинаково в любой операционной среде – в программном комплексе ИТ отдела, на ноутбуке пользователя или в облачном кластере [18]. Для эффективного управления и распространения этих образов существует множество платформ, среди которых, запущенный в 2014 году, Docker Hub — одна из первых и наиболее популярных платформ [18]. Однако исходя из текущего положения мировой политики, очень велик шанс того, что пользователи в России будут вынуждены переходить на локальные платформы для хранения и работы с Docker-образами [24].

Наиболее популярными отечественными платформами для работы с Docker-образами являются Yandex Cloud Container Registry, Cloud.ru Container Apps и VK Cloud Containers.

Yandex Cloud Container Registry — сервис для хранения и управления Docker-образами, интегрированный с экосистемой Yandex Cloud, предоставляемый компанией Яндекс [7]. Сервис был объявлен 9 июля 2019 года и запущен в том же году [12].

Cloud.ru Container Apps — платформа от компании Сбербанк, а в дальнейшем для развертывания и управления контейнеризированными приложениями, поддерживающая Docker и Kubernetes [3]. С 21 марта 2024 года перезапущена как часть Cloud.ru Evolution [27].

VK Cloud Containers — сервис, который позволяет разрабатывать и развертывать контейнеры с поддержкой Docker и Kubernetes, предоставляя гибкость и масштабируемость [6]. Официально запущен компанией VK Cloud (до 2021 года — Mail.ru Cloud Solutions, до 2022 года — VK Cloud Solutions) в мае 2018 года [19].

Методы исследования. Чтобы провести объективное сравнение вышеуказанных платформ, были выделены несколько ключевых критериев, влияющих на выбор платформы для хранения и работы с Docker-образами. Ниже представлены методы, с помощью которых можно провести измерения, а также числовые данные, которые будут использованы для сравнительного анализа результаты которого представлены в таблице 1.

Доступность и SLA — доступность платформы и предлагаемый уровень сервиса (SLA). Данный показатель измеряется как процент времени, когда платформа была доступна без сбоев в течение определённого периода времени (например, месяц). Данные можно получить с использованием систем мониторинга (например, Pingdom, Prometheus). **Метрика:** Процент доступности за месяц.

Скорость доставки и кэширования образов — время доставки Docker-образов конечным пользователям. Для замера этого показателя проводится тестирование загрузки Docker-образов на каждой платформе. Используются стандартные команды (docker pull) с замером времени отклика. Время загрузки образов можно также измерить через утилиты мониторинга сети. **Метрика**: Время в секундах для загрузки образа.

Безопасность хранения Docker-образов —уровень защиты данных и доступных механизмов контроля доступа на каждой из платформ. Оценивается уровень безопасности данных на каждой платформе по количеству механизмов защиты. Это может включать такие параметры, как шифрование данных при хранении, контроль доступа на основе ролей (RBAC), а также поддержка двухфакторной аутентификации (2FA). **Метрика**: Количество механизмов безопасности.

Интеграция с CI/CD — поддержка автоматизации процессов сборки, тестирования и развертывания приложений. Этот показатель замеряется на основе количества CI/CD систем, с которыми может интегрироваться платформа (например, Jenkins, GitLab CI, GitHub Actions). Информацию можно найти в официальной документации. **Метрика**: Количество поддерживаемых CI/CD систем.

Стоимость использования (размеры тарифов) —тарифные планы и модели оплаты за использование каждой из платформ. Стоимость рассчитывается на основе тарифов каждой платформы за хранение Docker-образов и использование сервисов. Основная метрика — это стоимость хранения 100 ГБ данных в месяц. **Метрика**: Стоимость в рублях за 100 ГБ хранения.

Масштабируемость платформы — способность платформы адаптироваться к растущим нагрузкам и расширению инфраструктуры. Измеряется способность платформы автоматически масштабироваться при увеличении нагрузки. Показатель выражается в максимальном количестве поддерживаемых контейнеров или узлов. **Метрика**: Максимальное количество контейнеров.

Мониторинг контейнерных образов — способность отслеживать и мониторить состояние контейнерных образов. Замеряется количество поддерживаемых инструментов для мониторинга, таких как Prometheus или Grafana, которые позволяют отслеживать состояние контейнерных образов. **Метрика**: Количество поддерживаемых инструментов мониторинга.

Результаты исследования. Результаты анализа по вышеуказанным критериям были сведены в таблицу 1, которая позволяет наглядно увидеть сильные и слабые стороны каждой платформы. Числовые данные, представленные ниже, были получены на основе проведённых тестов и анализа документации.

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа платформ

Платформа Критерии сравнения	Docker Hub	Yandex Cloud Container Registry	Cloud.ru Container Apps	VK Cloud Containers
Доступность и SLA (%)	99.9	99.95	99.9	99.8
Скорость доставки и кэширования образов (с)	3.1	2.8	4.0	3.5
Безопасность (кол-во механизмов)	3 [4]	1 [28]	1 [8]	2 [11]
Интеграция с CI/CD (кол-во систем)	4 [2]	5 [1]	3 [25]	3 [15]
Стоимость (руб./100 ГБ)	400 [20]	153 [23]	0 [25]	130 [26]
Масштабируемость (кол-во контейнеров)	1000 [14]	2000 [16]	1500 [11]	1200 [6]
Мониторинг (кол-во инструментов)	3 [30]	3 [7]	1 [25]	2 [26]

Для прогнозирования распределения использования платформ среди различных категорий пользователей, был введен коэффициент предпочтения платформы (КПП), который, для более точного анализа предпочтений различных категорий пользователей, был разделен на три отдельные модели: КПП для компаний**,** КПП для образовательных организаций и КПП для обычных пользователей. Каждая из этих моделей включает различные факторы, исходя из специфики их использования [9]. Для расчета веса каждого фактора используется метод парного сравнения критериев [29]. Критерии сравниваются попарно по важности для каждой категории пользователей, используя шкалу значений от 1 (равная важность) до 9 (максимальное превосходство одного критерия над другим). На основе этих сравнений строится матрица, которая нормируется для получения весов. Веса показывают относительную значимость критериев, что позволяет точно учитывать их в расчете коэффициента предпочтения платформы (КПП) для каждой модели. Также для корректности расчета КПП, все значения критериев были нормализованы при помощи метода минимально-максимальной нормализации [17].

Компании, как правило, уделяют наибольшее внимание надёжности сервиса, безопасности данных и возможностям интеграции с CI/CD [13]. Для них ключевыми критериями являются:

Доступность и SLA (40% от общего веса): компании должны быть уверены, что платформа доступна практически круглосуточно.

Безопасность хранения Docker-образов (25%): важен высокий уровень защиты данных.

Интеграция с CI/CD (20%): автоматизация разработки и тестирования – это ключевой процесс.

Масштабируемость (10%): важно, чтобы платформа легко масштабировалась при увеличении нагрузки.

Мониторинг контейнеров (5%): возможность отслеживания контейнеров помогает в управлении инфраструктурой.

Формула расчета:

$$\text{КПП компаний} = 0.4 \cdot SLA + (0.25 \cdot \text{Безопасность} + 0.2 \cdot \text{Интеграция} + 0.1 \cdot \text{Масштабируемость} + 0.05 \cdot \text{Мониторинг}) \cdot 100\%$$

Для образовательных учреждений основными критериями являются простота использования и низкие затраты на эксплуатацию [10]. В этой категории важны:

Стоимость использования (30%): бюджеты образовательных учреждений часто ограничены, поэтому приоритет — низкая стоимость.

Скорость доставки (30%): для учебных целей важно, чтобы время загрузки образов было минимальным.

Мониторинг (15%): возможность отслеживания состояния образов помогает глубже понимать работу с платформой.

Безопасность хранения Docker-образов (15%): образовательные учреждения также обращают внимание на защиту данных, особенно при работе с конфиденциальной информацией.

Доступность и SLA (10%): наличие платформы в любое время важно для учебного процесса.

Формула расчета:

$$\text{КПП образовательных организаций} = (0.3 \cdot (1 - \text{Стоимость}) + 0.3 \cdot \text{Скорость} + 0.15 \cdot \text{Мониторинг} + 0.15 \cdot \text{Безопасность}) \cdot 100\% + 0.1 \cdot SLA$$

Для обычных пользователей важны простота и доступность, а также минимальные расходы на использование платформы [21]. Их приоритеты:

Стоимость использования (55%): пользователи ищут максимально выгодные или бесплатные решения.

Доступность и SLA (30%): пользователи ожидают, что платформа будет доступна всегда, когда она нужна.

Мониторинг (10%): возможность отслеживать состояние образов интересует тех, кто активно разрабатывает и тестирует ПО.

Скорость доставки (5%): для разработчиков важна скорость загрузки образов, чтобы ускорить процессы тестирования и развертывания.

Формула расчета:

$$\text{КПП обычных пользователей} = (0.55 \cdot (1 - \text{Стоимость}) + 0.05 \cdot \text{Скорость} + 0.1 \cdot \text{Мониторинг}) \cdot 100\% + 0.3 \cdot SLA$$

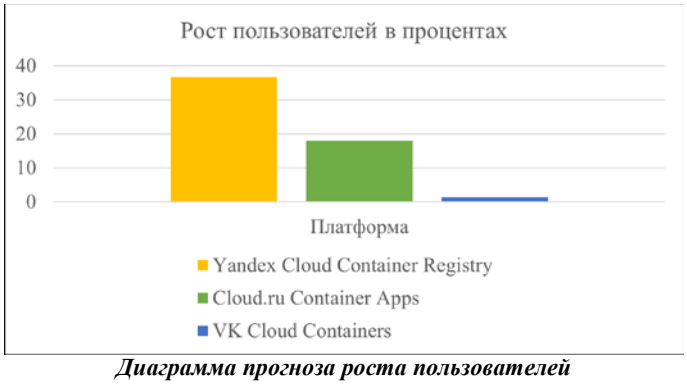


Диаграмма прогноза роста пользователей

На основании этих трёх моделей КПП можно спрогнозировать распределение пользователей между платформами:

1. Для компаний важны высокие показатели доступности (SLA), безопасности и интеграции с CI/CD. Они ищут платформы, которые гарантируют минимальные простои, надежную защиту данных и поддержку автоматизации. На основании расчетов КПП для компаний можно сделать следующие выводы:

Yandex Cloud Container Registry лидирует с КПП около 0.74 Это делает платформу предпочтительным выбором для крупных компаний, которым критически важны надежность и интеграция.

VK Cloud Containers занимает второе место с КПП около 0.67.

Cloud.ru Container Apps имеет КПП около 0.43 для компаний.

2. Для образовательных учреждений стоимость и простота использования — ключевые факторы [29]. На основе КПП для образовательных организаций можно предположить следующие результаты:

VK Cloud Containers будет лидером среди образовательных учреждений с КПП около 0.54.

Yandex Cloud Container Registry с КПП около 0.49 занимает второе место.

Cloud.ru Container Apps имеет КПП около 0.39.

3. Обычные пользователи, как правило, ориентированы на минимальные затраты и простоту работы с платформой. Рассчитывая КПП для обычных пользователей, можно сделать следующие выводы:

Cloud.ru Container Apps становится лидером с КПП около 0.84.

VK Cloud Containers занимает второе место с КПП около 0.45.

Yandex Cloud Container Registry с КПП около 0.44 занимает третье место.

Для прогноза роста пользователей по прогнозу распределения по платформам за основу была взята статистика использования технологий контейнеризации в России из исследования VK Cloud [5]. Таким образом, в случае прекращения доступа к Docker Hub, можно предположить следующий рост пользователей:

Yandex Cloud Container Registry привлечет крупные компании благодаря высоким показателям доступности и безопасности. Прирост пользователей — 36.6%.

Cloud.ru Container Apps станет предпочтительным выбором для образовательных организаций и разработчиков с ограниченными бюджетами. Прогнозируемый прирост — 18%.

VK Cloud Containers увеличит число пользователей за счет обычных разработчиков и фрилансеров, ориентированных на доступные тарифы и гибкость. Прогнозируемый рост — 1.4%.

Для наглядного представления анализ роста пользователей отображен на рисунке 1.

Выводы. Таким образом платформы управления и распространения Docker-образов являются неотъемлемой частью любого приложения. Несмотря на то, что большую часть рынка занимает DockerHub российские компании разрабатывают и поддерживают свои решения, предоставляя российским пользователям вариативность в выборе инструментов. В случае же ухода DockerHub с рынка России, данные отечественные решения предоставляют всё необходимое для продолжения корректной работы всех процессов российского общества.

Список литературы

1. CI/CD в облаке – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.cloud/ru/solutions/ci-cd?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения: 10.10.2024).
2. CI/CD с Docker для начинающих – 2021 [Электронный ресурс]. URL: https://kodekloud.com/blog/ci-cd-with-docker (дата обраще-ния: 10.10.2024).
3. Cloud.ru Container Apps – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://cloud.ru/products/evolution-container-apps (дата обращения: 09.10.2024).
4. Docker – Лучшие практики безопасности – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://www.geeksforgeeks.org/docker-security-best-practices (дата обращения: 09.10.2024).
5. State of Kubernetes – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://cloud.vk.com/promopage/state-of-kubernetes (дата обращения: 25.10.2024).
6. VK Cloud Containers – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://cloud.vk.com/containers (дата обращения: 10.10.2024).
7. Yandex Cloud Container Registry – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.cloud/ru/services/container-registry (дата обращения: 09.10.2024).
8. Аналоги Docker в России: обзор продуктов – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://www.securitylab.ru/blog/personal/paragraph/354192.php (дата обращения: 08.10.2024).
9. Баутов А.Н. Оценка факторов, влияющих на качество про-граммных продуктов [Электронный ресурс] / А.Н. Баутов // Директор информационной службы. 2001. № 11-12. URL: https://www.osp.ru/cio/2001/11-12/171992 (дата обращения: 17.10.2024).
10. Башкатов А.М., Добровольская Е.В., Терещенко Е.В. О критериях выбора программного обеспечения, используемого для учебных и научных задач вуза / А.М. Башкатов, Е.В. Добровольская, Е.В. Терещенко // Евразийский Союз Ученых. 2016.
11. Безопасность K8s: защита кластеров в Cloud Containers от VK Cloud и Luntry – 2023 [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/vk/articles/759026 (дата обращения: 11.10.2024).
12. В общий доступ выходит сервис Yandex Container Registry [Электронный ресурс] // Yandex Cloud. URL: https://yandex.cloud/ru/blog/posts/2019/07/container-registry (дата обращения: 08.10.2024).
13. Верников Г.Г. Основные принципы выбора прикладного программного обеспечения для построения корпоративной информационной системы [Электронный ресурс] / Г.Г. Верников // Корпоративный менеджмент. URL: https://www.cfin.ru/vernikov/kias/choice.shtml (дата обращения: 14.10.2024).
14. Как устроен Docker и почему он популярен – 2022 [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.cloud/ru/blog/posts/2022/03/docker-containers (дата обращения: 10.10.2024).
15. Как устроен Kubernetes as a Service на платформе VK Cloud Solutions – 2020 [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/vk/articles/519366 (дата обращения: 09.10.2024).
16. Квоты и лимиты для сервисов Yandex Cloud – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.cloud/ru/docs/overview/concepts/quotas-limits (дата обращения: 10.10.2024).
17. Кодов А. Как нормализовать данные и зачем это нужно [Электронный ресурс] URL: https://sky.pro/media/kak-normalizovat-dannye-i-zachem-eto-nuzhno (дата обращения: 14.10.2024).
18. Моуэт Э. Использование Docker. М.: ДМК Пресс, 2017. 354 с.
19. Облачная платформа Mail.Ru Cloud Solutions выходит на рынок PaaS [Электронный ресурс] URL: https://www.cnews.ru/news/line/2018-05-21_oblachnaya_platforma_mailru_cloud_solutions_vyhodit (дата обращения: 08.10.2024).
20. Основные подписки Docker – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://www.docker.com/pricing (дата обращения: 10.10.2024).
21. Панико К., Сеннамо К. Предпочтения пользователей и стратегические взаимодействия в экосистемах платформ // Strat Mgmt J. 2020.
22. Потемкин А.С., Шендяпин А.В., Петросян Л.Э. Внедрение технологий искусственного интеллекта в образовательных организациях Российской Федерации // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 5.
23. Правила тарификации для Container Registry – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://yandex.cloud/ru/docs/container-registry/pricing (дата обращения: 10.10.2024).

24. Программистов отключили от Docker Hub [Электронный ресурс] URL: https://www.kommersant.ru/doc/6731248 (дата обращения: 08.10.2024).
25. Репозитории, реестры, хостинги - Cloud.ru Container Apps – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://x-kit.ru/hranenie-i-upravlenie-dannymi/repositories-registries-hosting/cloud-container-apps (дата обращения: 09.10.2024).
26. Репозитории, реестры, хостинги - VK Cloud Containers – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://x-kit.ru/hranenie-i-upravlenie-dannymi/repositories-registries-hosting/vk-cloud-containers (дата обращения: 09.10.2024).
27. Сбербанк заработает на облаках [Электронный ресурс] URL: https://www.vedomosti.ru/finance/articles/2018/04/02/755542-sberbank-zarabotaet-na-oblakah (дата обращения: 08.10.2024).
28. Современная безопасность контейнерных приложений – 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/oleg-bunin/articles/786930 (дата обращения: 11.10.2024).
29. Спиридонов С.Б., Булатова И.Г., Постников В.М. Анализ подходов к выбору весовых коэффициентов критериев методом парного сравнения критериев // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2017. Т. 9, № 6. [Электронный ресурс] URL: https://naukovedenie.ru/PDF/16TVN617.pdf (дата обращения: 14.10.2024).
30. Упрощаем мониторинг и управление контейнерами Docker при помощи инструментов CLI – 2022 [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/first/articles/658951 (дата обращения: 13.10.2024).

Потемкин Александр Станиславович, магистрант, alex.potjomkin@gmail.com, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА,

Узоров Кирилл Александрович, магистрант, uzorov.kirill@mail.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА,

Петросян Лусинэ Эдуардовна, канд. эконом. наук, доцент, mail@mfmgutu.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

ANALYSIS OF RUSSIAN PLATFORMS FOR STORING AND MANAGING DOCKER IMAGES

A.S. Potemkin, K.A. Uzorov, L.E. Petrosyan

This article provides an overview of Russian systems-analogues of DockerHub, for storing and processing Docker images. Popular modern developments in this area are shown. A comparative analysis of Russian platforms for storing and working with Docker images was made and a forecast of the growth or decrease in the number of users of each of them was made, in the event of the cessation of Docker Hub
Key word: Docker images, containerization systems, software, Russian analogues, clusters.

Potemkin Alexander Stanislavovich, undergraduate, alex.potjomkin@gmail.com, Russia, Moscow, Russian Technological University MIREA,

Uzorov Kirill Alexandrovich, undergraduate, uzorov.kirill@mail.ru, Russia, Moscow, Russian Technological University of MIREA,

Petrosyan Lusine Eduardovna, candidate of economics sciences, docent, mail@mfmgutu.ru, Russia, Moscow, Russian University of Technology MIREA

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-708-709

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ KOTLIN MULTIPLATFORM ДЛЯ КРОССПЛАТФОРМЕННОЙ МОБИЛЬНОЙ РАЗРАБОТКИ

М.А. Раджапов, К.Д. Чемухин, Л.Э. Петросян

Цель статьи заключается в анализе перспектив использования технологии кроссплатформенной разработки KMM от JetBrains в контексте мобильной разработки. Были выявлены преимущества и недостатки KMM. Был выполнен анализ исследований среди разработчиков, использовавших KMM с 2021 до 2024 гг. Приведён результат анализа количества проектов в GitHub, написанных на разных кроссплатформенных технологиях. По результатам анализа KMM активно увеличивается в количестве новых проектов.
Ключевые слова: Kotlin Multiplatform, мобильная разработка, Android, IOS, Kotlin, кроссплатформенная разработка.

В настоящее время мобильная разработка включает в себя разработку приложений не только для смартфонов, но и для носимой электроники, смарт-телевизоров, электронных книг, современных автомобилей и т.д. Вместе с ростом числа мобильных устройств растёт и число пользователей [1]. Это накладывает особые требования к разработке мобильных приложений. Пользователи должны получать единообразный пользовательский опыт (UX) при взаимодействии с приложением вне зависимости от платформы и при этом приложения должны работать исправно на разных платформах.

Кроссплатформенный подход к разработке приложений позволяет создавать единую кодовую базу для приложений, которые могут работать под управлением различных операционных систем (Android, IOS, Windows) [2]. Среди популярных технологий, позволяющих реализовать такие технологии, есть React Native, Flutter и Kotlin Multiplatform [3]. Основными функциями таких технологий являются: абстрагирование от платформенной специфики, унификация интерфейсов программирования приложений (API), обеспечение совместимости с различными операционными системами (ОС) и их версиями.

Kotlin Multiplatform (KMM) является довольно молодой технологией, в сравнении с другими кроссплатформенными технологиями, как React Native и Flutter. KMM впервые был анонсирован в 2017 году на конференции KotlinConf 2017 под названием Kotlin Multiplatform Project [4]. Команда разработчиков JetBrains в 2020 году с выходом альфа-версии поменяла название продукта на Kotlin Multiplatform Mobile и сфокусировалась на улучшении наиболее часто используемой функции – написании совместного кода для двух самых популярных ОС в мобильных устройствах - Android и IOS. В 2023 году название поменялось на Kotlin Multiplatform [5]. С мая 2024 года компания Google, владелец операционной системы Android, объявила об официальной поддержке KMM для кроссплатформенной разработки [6].

Основная часть. Компании, разрабатывающие программное обеспечение, для успешного запуска и удержания пользователей должны учитывать сильные стороны у конкурентов и предлагать для своих пользователей такой же уровень качества или лучше. С активным импортозамещением программ в российском рынке это является актуальным. Для компаний-разработчиков отечественных программ, от которых могут зависеть жизни и здоровье людей, как, например для ИТ-решений в гражданской авиации, особенно важно уделить внимание на их стабильность [7]. Кроссплатформенные разработка позволяет объединить разработку для нескольких платформ в одну кодовую базу.

В табл. 1 представлены преимущества и недостатки KMM в сравнении с его конкурентами [8].

Таблица 1

Преимущества и недостатки KMM

№ п/п	Преимущества	Недостатки
1	**Поддержка языка разработки Kotlin.** Так как KMM поддерживает язык программирования Kotlin – основной язык разработки для Android-разработчиков, то для них не надо изучать новый язык.	**Новая технология.** KMM вышла совсем недавно, поэтому библиотек, особенно кроссплатформенных, на данной технологии ещё мало, но уже есть такие основные библиотеки, как Ktor, SQLDelight/Realm и т.д.
2	**Нативный UI для каждой платформы**. Для отрисовки элементов пользовательского интерфейса Kotlin Multiplatform использует декларативный фреймворк Compose Multiplatform. Это позволяет сделать UI приложений на KMM более естественными и приятными для пользователей, чем «рисование» единого UI для всех платформ (например, как во Flutter).	**Большая кодовая база приложений.** Использование нативного UI для каждой платформы требует примерно в два раза больше кода для пользовательского интерфейса, чем у конкурентов.

В 2021 году команда JetBrains, создатель KMM, провела серию опросов среди разработчиков. Первый опрос посвящён выяснению для каких платформ разработчики используют технологию KMM [9]. На рис. 1 представлена круговая диаграмма, построенная на результатах этого опроса.

Согласно опросу 56,7% разработчиков используют KMM для кроссплатформенной мобильной разработки (Android и IOS), 8,9% разработчиков используют в backend и web сфере, 6,6% используют для кроссплатформенной и web разработки, 4,1% - для кроссплатформенной и backend-разработки, 4,4% - только для разработки десктопных приложений. Кроссплатформенные приложения и приложения для носимых устройств разрабатывают только 2.5% разработчиков. 12.1% используют KMM для всех доступных платформ. Оставшиеся 4.7% разрабатывают для платформ, не перечисленных в опросе. [9]

Среди всех платформ в 2021 году разработка для Android и IOS являлась самым популярным вариантом использования KMM.

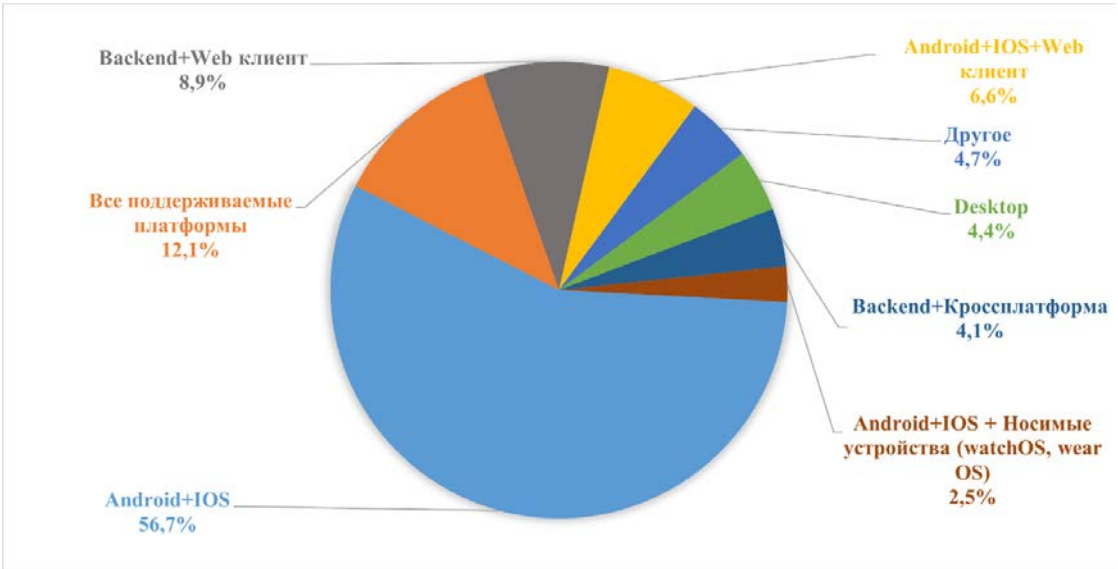


Рис. 1. Диаграмма использования KMM по платформам. Источник: составлено авторами на основе опроса от JetBrains [9]

На рис. 2 представлена столбчатая диаграмма, построенная на результатах следующего опроса от JetBrains, который показывает какая доля из общей кодовой базы проектов была написана с использованием KMM. Согласно нему, большинство разработчиков переиспользуют 50-70% кодовой базы проекта с помощью KMM. Также из данного опроса следует вывод, что почти половина (47,5%) разработчиков имеют на своих проектах более половины кодовой базы на KMM, что свидетельствует о гибкости и совместимости KMM с другими технологиями. [9]

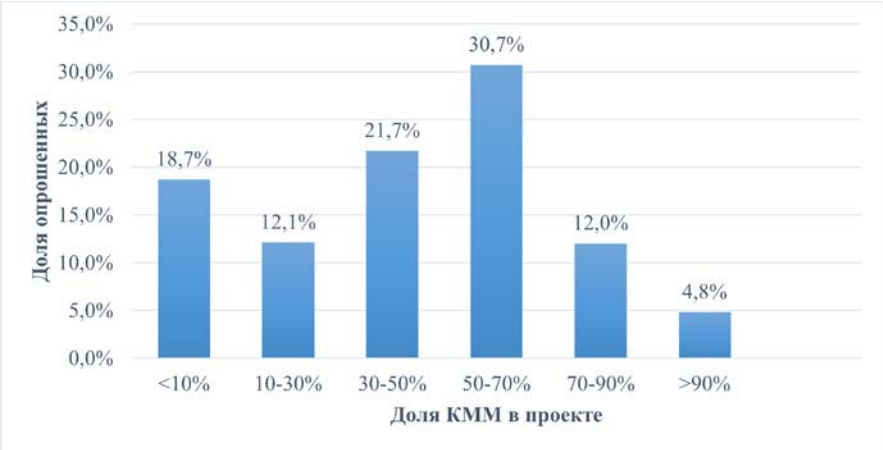


Рис. 2. Диаграмма использования общего кода на KMM. Источник: составлено авторами на основе опроса от JetBrains [9]

Быстрое внедрение новой технологии позволяет сократить время разработки и быстрее выпустить продукт на рынок. На рис. 3 представлена диаграмма, отображающие результаты другого опроса от JetBrains, показывающего время, которое затратили разработчики на миграцию своих проектов на KMM. Согласно опросу, для 21,6% опрошенных миграция заняла менее 1 месяца, для 33,6% - от 1 до 3 месяцев, для 31,9% - от 3 до 6 месяцев, для 11,2% - от 6 до 12 месяцев и для 1,7% внедрение заняло более года. [9]

Для 85.3% опрошенных миграция проектов заняла не более 6 месяцев. Относительно быстрое внедрение говорит о его простоте и удобстве использования.

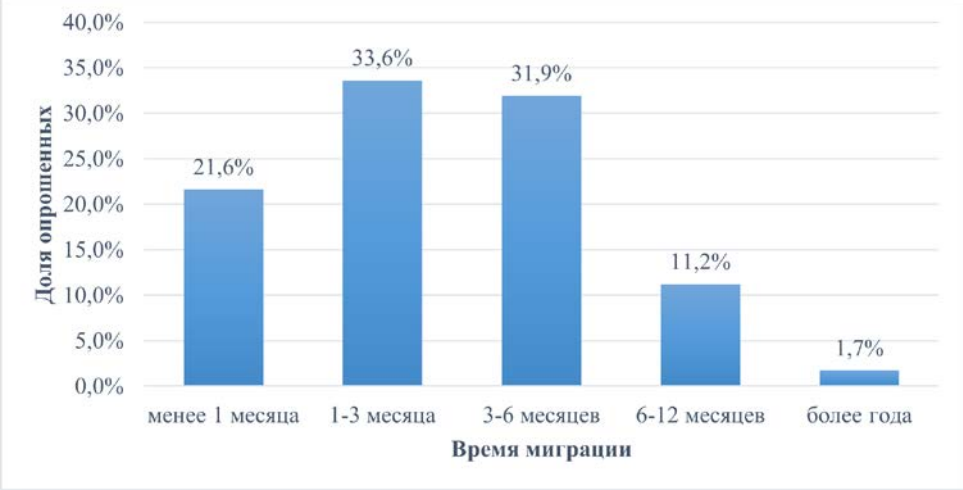


Рис. 3. Диаграмма времени миграции на KMM. Источник: составлено авторами на основе опроса от JetBrains [9]

В 2024 году компанией Snapp Mobile, специализирующейся на разработке программного обеспечения для мобильных устройств, была проведена собственная серия опросов среди разработчиков [10]. В них участвовали 319 разработчиков со всего мира.

Результат первого опроса, посвящённый платформам, для которых разрабатывается код с использованием KMM, представлен на рис. 4. Для IOS разрабатывают 32% опрошенных, для Android – 34%, JVM – 15%, JavaScript – 7%, Native – 6%, Web – 6%.

66% опрошенных используют KMM для разработки под IOS и Android. Кроссплатформенная мобильная разработка остаётся главной областью применения KMM.

Несмотря на активное развитие, у технологии есть ряд недостатков. Об этом свидетельствует следующий опрос [10], где показано с какими трудностями сталкивались разработчики во время работы с KMM. Результат данного опроса представлен на диаграмме, представленной на рис. 5. На первых местах находятся проблемы интеграции и сложность отладки – по 21%. Далее идут проблемы с малым количеством документации и ограниченной поддержкой сторонних библиотек – по 19%. Скорость сборки является проблемой для 16% разработчиков. 4% опрошенных разработчиков сталкивались с, проблемами тестирования приложений, сложностями конфигурации проекта и сложностями сборки проекта.

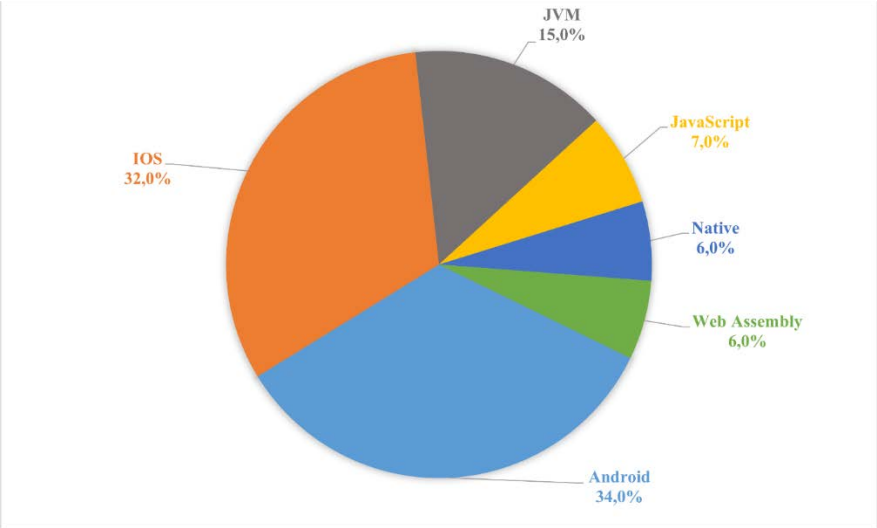


Рис. 4. Диаграмма использование KMM по платформам. Источник: составлено авторами на основе опроса от Snapp Mobile [10]

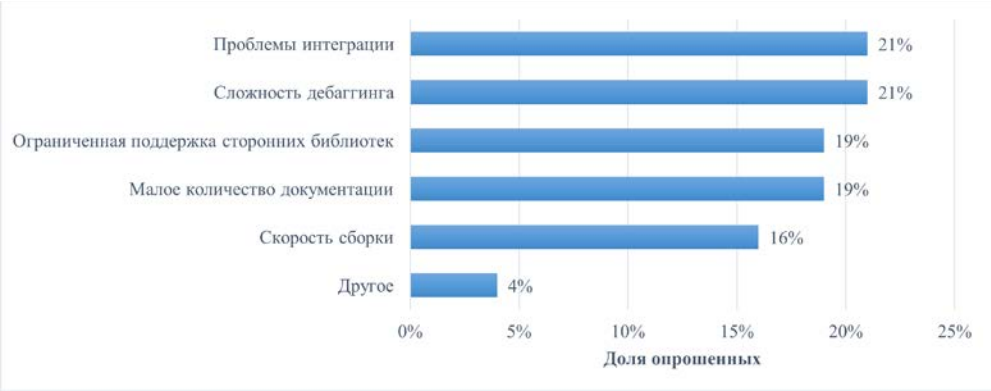


Рис. 5. Диаграмма проблем при работе с KMM. Источник: составлено авторами на основе опроса от Snapp Mobile [10]

Следующий опрос от Snapp Mobile посвящён ожидаемым улучшениям KMM, который представлен на диаграмме, представленной на рис. 6 [10]. Разработчики в будущих релизах ожидают улучшения инструментов разработки – 27%, улучшения совместимости между платформами (Android, IOS, Web) – 25%, улучшения документации и обучающих пособий – 22%, улучшения производительности – 18%, а также улучшенную совместимость со Swift и другими системами – 8%.

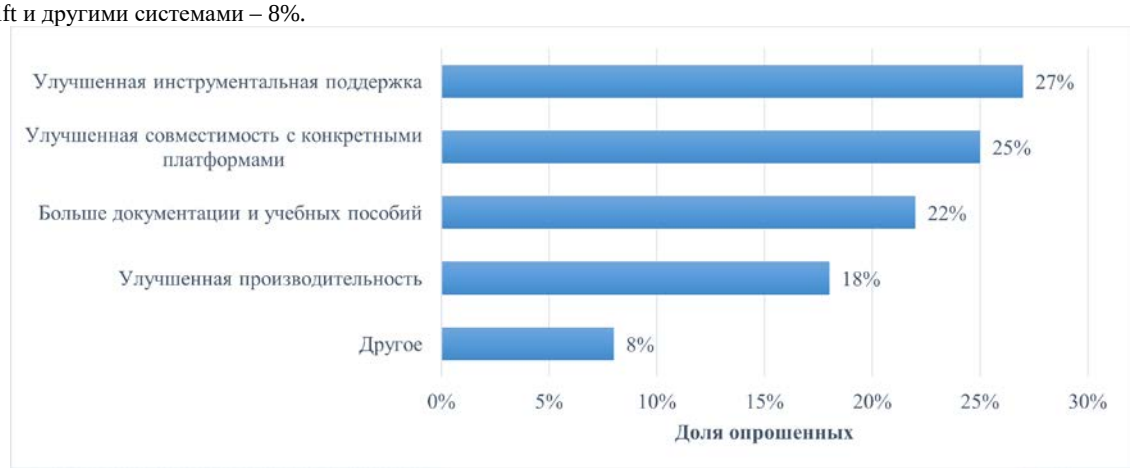


Рис. 6. Диаграмма ожидаемых улучшений KMM. Источник: составлено авторами на основе опроса от Snapp Mobile [10]

Следующий опрос Snapp Mobile посвящён участию разработчиков в улучшении KMM [10]. На рис. 7 представлена круговая диаграмма, посвящённая данному опросу. Согласно нему, 51% разработчиков вносят вклад в open-source проекты и участвуют в сообществе KMM, тем самым улучшая платформу. Вовлечённость разработчиков и их заинтересованность в улучшении KMM способствует к более стабильной, удобной и функциональной платформе.

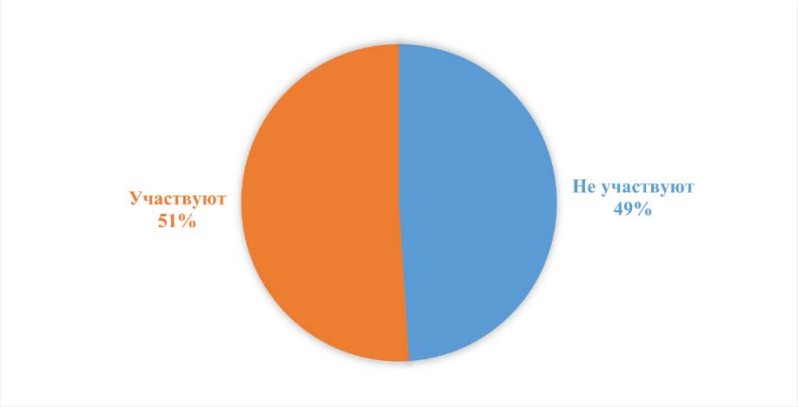


Рис. 7. Диаграмма участия разработчиков в развитии KMM. Источник: составлено авторами на основе опроса от Snapp Mobile [10]

В табл. 2 приведен ряд крупных международных и российских компаний, использующих KMM. [11]

Таблица 2

Компании, использующие KMM

№ п/п	Наименование компаний	Описание
1	Forbes	Финансово-экономический журнал, использует для своих мобильных приложений KMM, переиспользуя более 80% внутреннего кода между Android и IOS.
2	McDonald's	Сеть ресторанов быстрого питания. Использует KMM для своего глобального мобильного приложения.
3	Netflix	Технологическая компания, снимает оригинальный развлекательный контент и имеет стриминговый сервис фильмов и сериалов, использует KMM для своего приложения Prodicle.
4	Philips	Использует KMM для своей мобильной платформы HealthSuite
5	Autodesk	Разработчик программных продуктов для архитекторов, инженеров и конструкторов.
6	VMware	Разработчик программного обеспечения для виртуализации.
7	Memrise	Учебная платформа.
8	Яндекс	Крупная российская IT компания. Использует KMM на множестве своих проектов, например, в «Яндекс Картах»
9	Лемана ПРО (Леруа Мерлен)	Сеть строительных магазинов. Использует KMM для своего мобильного приложения на российском рынке.

Яндекс, которая является крупнейшей компанией на российском рынке в сегменте информационных технологий, начала использовать KMM с 2021 года с разработки единой кодовой базы для функции показа информации о концертах, выставках и других событий в приложении Яндекс.Карты [12]. Лемана ПРО с 2021 года мигрировала своё мобильное приложение с нативной разработки на технологию KMM [13].

Благодаря преимуществам KMM, наблюдается тенденция, что все больше и больше компаний пробуют использовать его на своих проектах.

В табл. 3 представлен результат анализа количества новых проектов на платформе GitHub, написанных на React Native, Flutter и KMM за период с 2021 по 2024 годы.

Таблица 3

Количество новых кроссплатформенных проектов

Год / Технологии кроссплатформенной разработки	2021	2022	2023	2024
React Native	45900	43500	54600	57500
Flutter	95600	82800	77300	69500
KMM	549	688	1800	2000

Видно, что лидерами являются Flutter и React Native, но также заметно, насколько стремительно увеличивается популярность KMM. С каждым годом всё больше и больше людей пробуют его в своих проектах.

Выводы. Подводя итоги, можно увидеть, что KMM в кроссплатформенной мобильной разработке активно развивается и улучшается. Всё больше и больше компаний пробуют использовать его в своих проектах и также быстро растёт его использование в проектах с открытым исходным кодом. Лёгкость и быстрота перехода с нативной Android разработки и активное развитие KMM делают его хорошим решением для современной кроссплатформенной мобильной разработки. Участие разработчиков, с другой стороны, в сообществе вносит свой вклад на развитие и улучшение платформы, а также по результатам анализа KMM, можно сделать вывод, что количество новых проектов стремительно увеличивается в количестве новых проектов.

Однако, несмотря на все преимущества, KMM не лишён недостатков. Среди них преобладают сложности отладки, сложности интеграции и малое количество документации. Тем не менее, технология явно имеет все перспективы выбиться в лидеры в кроссплатформенной мобильной разработке.

Список литературы

1. Петросян Л.Э., Гусев К.В. Разработка мобильных приложений на языке Kotlin: учебное пособие для вузов. СПб: Лань, 2024. 104 с.

2. Гудимов А.Г. Обзор возможностей кроссплатформенной разработки приложений // Развитие современной науки и образования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Пенза: МЦНС, 2022. С. 36-38.

3. Адещенко К.Р. Инструменты кроссплатформенной разработки: сравнительный анализ // Актуальные исследования. 2024. №12 (194). С. 41-49.

4. Update on the Name of Kotlin Multiplatform // JetBrains Blog [Электроный ресурс] URL: https://blog.jetbrains.com/kotlin/2023/07/update-on-the-name-of-kotlin-multiplatform (дата обращения: 28.10.2024).

5. Kotlin Multiplatform Mobile (KMM) превращается в Kotlin Multiplatform (KMP) // Apptractor [Электроный ресурс] URL: https://apptractor.ru/info/news/kotlin-multiplatform-mobile-kmm-prevraschaetsya-v-kotlin-multiplatform-kmp.html (дата обращения: 05.11.2024).

6. Android Support for Kotlin Multiplatform (KMP) to Share Business Logic Across Mobile, Web, Server, and Desktop // Android Developers Blog [Электроный ресурс] URL: https://android-developers.googleblog.com/2024/05/android-support-for-kotlin-multiplatform-to-share-business-logic-across-mobile-web-server-desktop.html (дата обращения: 05.11.2024).

7. Раджапов М.А., Сысолятина П.А., Гукасян Г.К. Анализ отечественных ИТ-решений в гражданской авиации // X всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности». Таганрог: 2023. С. 253-255.

8. The State of Kotlin Multiplatform // Habr [Электроный ресурс] URL: https://habr.com/ru/companies/usetech/articles/747926 (дата обращения: 30.09.2024).

9. Results of the Kotlin Multiplatform Survey Q1-Q2 2021 // JetBrains [Электроный ресурс] URL: https://blog.jetbrains.com/kotlin/2021/10/multiplatform-survey-q1-q2-2021 (дата обращения: 30.09.2024).

10. Introducing the Kotlin Multiplatform Developer Survey 2024 by Snapp Mobile // Snappmobile [Электроный ресурс] URL: https://www.snappmobile.io/kmp (дата обращения: 30.09.2024).

11. Case studies // JetBrains [Электроный ресурс] URL: https://www.jetbrains.com/help/kotlin-multiplatform-dev/case-studies.html (дата обращения: 30.09.2024).

12. Готовим Большую Фичу™ на Kotlin Multiplatform. Доклад Яндекса // Habr [Электроный ресурс] URL: https://habr.com/ru/companies/yandex/articles/542454 (дата обращения: 05.11.2024).

13. KMM на практике или выбор кроссплатформенного фреймворка для «Леруа Мерлен» // Apptractor [Электроный ресурс] URL: https://apptractor.ru/info/articles/kmm-na-praktike.html (дата обращения: 05.11.2024).

Раджапов Мирзиёд Адхам угли, студент, radzapovm9@gmail.com, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА,

Чемухин Константин Дмитриевич, студент, kostyan5544@gmail.com, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА,

Петросян Лусинэ Эдуардовна, канд. экон. наук, доцент, Petrosyan@mirea.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

ANALYZING THE PROSPECTS OF KOTLIN MULTIPLATFORM FOR CROSSPLATFORM MOBILE DEVELOPMENT

M.A. Radjapov, K.D. Chemukhin, L.E.P etrosyan

The purpose of the article is to analyze the prospects of using KMM cross-platform development technology from JetBrains in the context of mobile development. The advantages and disadvantages of KMM were identified. The research among developers who used KMM from 2021 to 2024 was analyzed. The result of analyzing the number of projects in GitHub written on different cross-platform technologies was presented. According to the results of the analysis, KMM is actively increasing in the number of new projects.

Key words: Kotlin Multiplatform, mobile development, Android, IOS, Kotlin, cross-platform development.

Radjapov Mirziyod Adkham ugli, student, radzapovm9@gmail.com, Russia, Moscow, Russian Technological University MIREA,

Chemukhin Konstantin Dmitrievich, student, kostyan5544@gmail.com, Russia, Moscow, Russian Technological University MIREA,

Petrosyan Lusine Eduardovna, candidate of economical sciences, docent, Petrosyan@mirea.ru, Russia, Moscow, Russian Technological University MIREA

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-714-715

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО НКО И СТУДЕНЧЕСКИМИ IT-СТАРТАПАМИ ПОСРЕДСТВОМ ОНЛАЙН-ПЛАТФОРМЫ

Д.О. Судьина, Л.Э. Петросян

В данной статье представлен анализ современного состояния инновационного развития социально ориентированных некоммерческих организаций (далее – СО НКО). Особое внимание уделено роли взаимодействия студентов российских университетов в продвижении инноваций в СО НКО, в частности в сфере информационных технологий. Проведено исследование, включающее опрос СО НКО и студентов российских вузов, направленное на выявление практической значимости и перспектив такого сотрудничества. Проанализирован понятийный аппарат. Описана концепция реализации онлайн-портала готовых студенческих IT стартапов для СО НКО.

Ключевые слова: студенческий стартап, IT-стартап, команды-разработчики, инновации в СО НКО, инновационное развитие, инновационное решение, цифровизация, некоммерческий сектор, онлайн-портал, оптимизация.

Развитие инновационной деятельности социально ориентированных некоммерческих организаций (далее – СО НКО) является одним из ключевых направлений для России в XXI веке. За последние несколько лет увеличилось число СО НКО, которые применяют цифровые технологии для лучшей оптимизации своей деятельности. По данным экспертов в области цифровизации, участвовавших в Международном форуме «Kazan Digital Week 2024», было отмечено, что уровень цифровых компетенций СО НКО в период с 2022 по 2024 года достиг 93%, что значительно выше, чем в период с 2019 по 2021 год – 85 % [1].

С 2022 года, в условиях специальной военной операции, государство активно поддерживает СО НКО, включая благотворительные фонды, расширяя меры информационной поддержки. В рамках этой поддержки СО НКО предоставляются вычислительные мощности для функционирования информационных систем, а также содействие в создании и поддержании официальных сайтов. В условиях, когда государство активно поддерживает СО НКО, важно понимать, что данная тема актуальна и цель исследования заключается в поддержке именно тех инициатив, которые работают на благо общества.

Важно отметить, что со стороны органами государственной власти и органами местного самоуправления также проводятся конкурсы такие как:

- Фонд президентских грантов;
- Президентский фонд культурных инициатив;
- Институт развития интернета.

Согласно данным Общественной палаты РФ, в 2023 году на реализацию 163 проектов, направленных на поддержку СО НКО в сфере инновационных технологий, было выделено около 10,3 миллиардов рублей. Это свидетельствует о том, что государство активно поддерживает развитие инновационного некоммерческого сектора, что открывает новые возможности для студенческих команд-разработчиков стартапов [2].

Студенты вузов часто становятся членами команд, разрабатывающих стартапы. С 2023 года в российских вузах действует программа «Обучение служением», которая направлена на укрепление взаимодействия между СО НКО и вузами. Согласно данным платформы «Добро.рф», с момента запуска программы к ней присоединились около 52 тысяч студентов. Именно это взаимодействие СО НКО и вузов является темой данного научного исследования, в рамках которого проектируется и разрабатывается онлайн-портал с целью упрощения и улучшения сотрудничества между СО НКО и студенческими IT-стартапами - командами разработчиков или отдельных членов команд студенческих стартапов [2, 3].

Сотрудничество между образовательным и третьим сектором является актуальным направлением, поскольку объединяет потребности обеих сторон, нацеленных на достижение результата в рамках своих профессиональных компетенций. Образовательный сектор в лице студентов разработчиков нуждается в практическом применении своих знаний и навыков, а третий сектор - в дополнительных ресурсах для реализации своих социальных проектов.

Для обоснования данных аргументов авторами статьи был проведен опрос среди студентов российских вузов и колледжей, таких как МГУТУ им. К.Г. Разумовского, НИУ МЭИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МИРЭА - Российский технологический университет, по IT-направлениям. Результаты опроса среди студентов представлены на рисунке 1.

В опросе приняли участие преимущественно (87,6%) обучающиеся студенты и выпускники бакалавров/магистров вузов, при этом 12,6% составили обучающиеся студенты и выпускники колледжей.

По результатам опроса, 81,3% участников испытывают трудности с поиском заказчика для разработки в рамках своей ВКР/диссертации. В то же время, 18,8% участников предположительно успешно нашли Заказчиков или не испытывают проблем с их поиском.

Около 75% респондентов выразили интерес в получении акта о внедрении или грамоты от заказчика за реализованный проект. Остальные 25% участников отклонили данное рассмотрение предложения.

В целом, результаты опроса подчеркивают необходимость в создании механизмов, помогающих студентам находить Заказчиков для своих ВКР/диссертаций, а также в признании их труда нематериальными наградами, доказывающих значимость фактического результата их деятельности.

Также был проведен онлайн-опрос среди СО НКО, направленный на выявление потребностей СО НКО в инновациях, включая оценку текущего положения СО НКО и потенциального взаимодействия СО НКО со студенческими IT-стартапами – командами разработчиков.

Результаты первой части опроса в СО НКО показаны на рисунке 2.

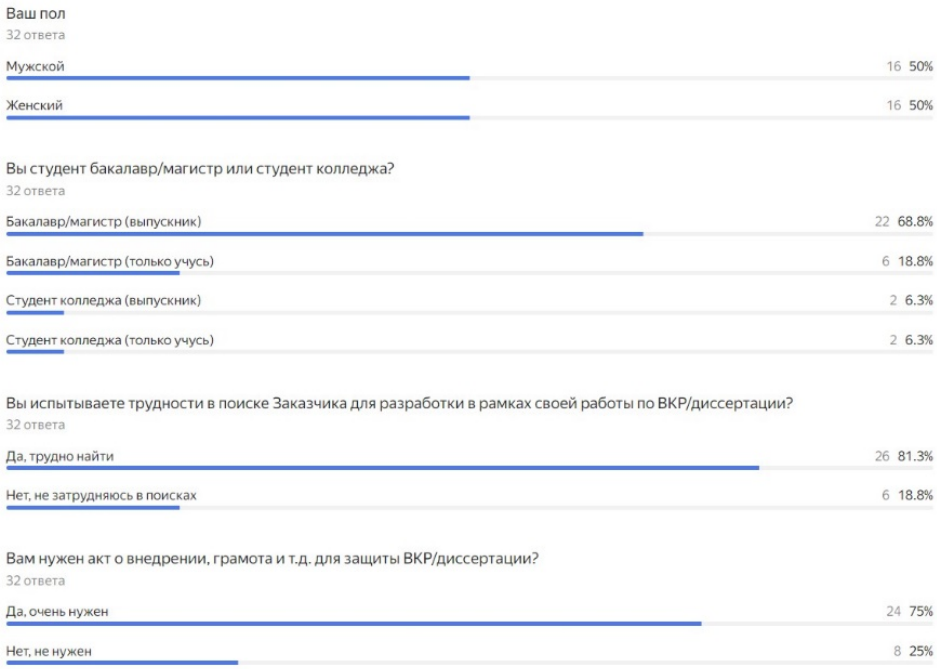


Рис. 1 Опрос среди студентов

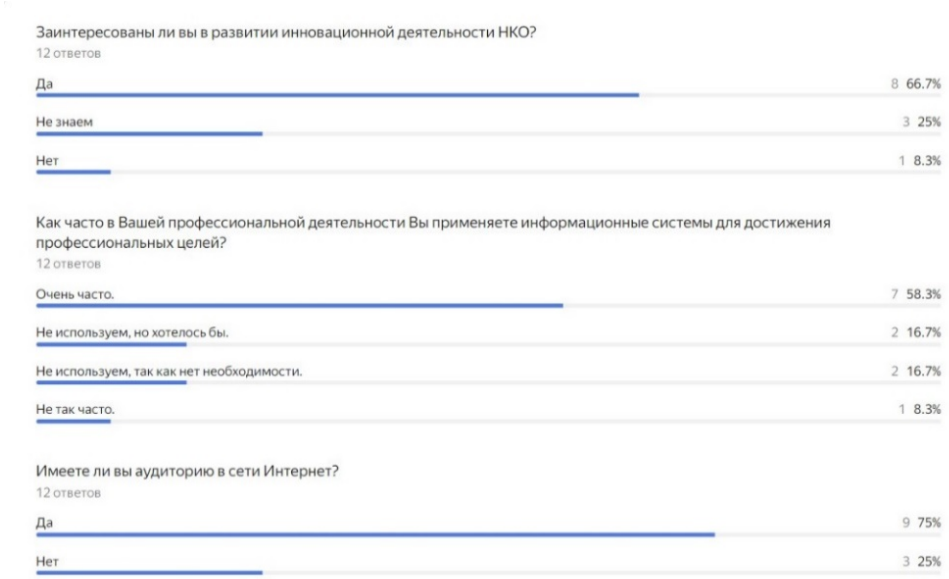


Рис. 2 Опрос в СО НКО. Часть первая

Опрос среди СО НКО демонстрирует значительный интерес к инновациям: 66,7% ответили, что заинтересованы в их развитии. Однако, существует и разница в опыте применения инноваций: 58,3% СО НКО уже используют инновационные разработки в своей деятельности, 16,7% не используют инновации, но выразили желание протестировать работу с ними, 16,7% респондентов не испытывают необходимости, а оставшиеся 8,3% используют инновации, но не так часто.

Стоит отметить, что около 75% опрошенных СО НКО уже имеют свою аудиторию в интернете, в то время как 25% - нет.

Результаты второй части опроса представлены на рисунке 3.

Около 66,7 % респондентов пробовали нанимать IT-специалистов для реализации инновационных проектов в то время, как 33,3% СО НКО не испытывали необходимости в данной потребности.

Помимо этого, 83,3% опрошенных СО НКО ответили, что сталкивались с финансовыми трудностями при попытках реализации инновационных проектов. В то же время, 16,7% респондентов не испытывали подобных сложностей.

Отношение СО НКО к использованию IT-специалистов, являющихся студентами российских вузов, неоднозначно: 50% выразили положительный интерес, 41,7% отнеслись нейтрально, но готовы рассмотреть данную возможность, 8,3% высказали недоверие к компетенции студентов.

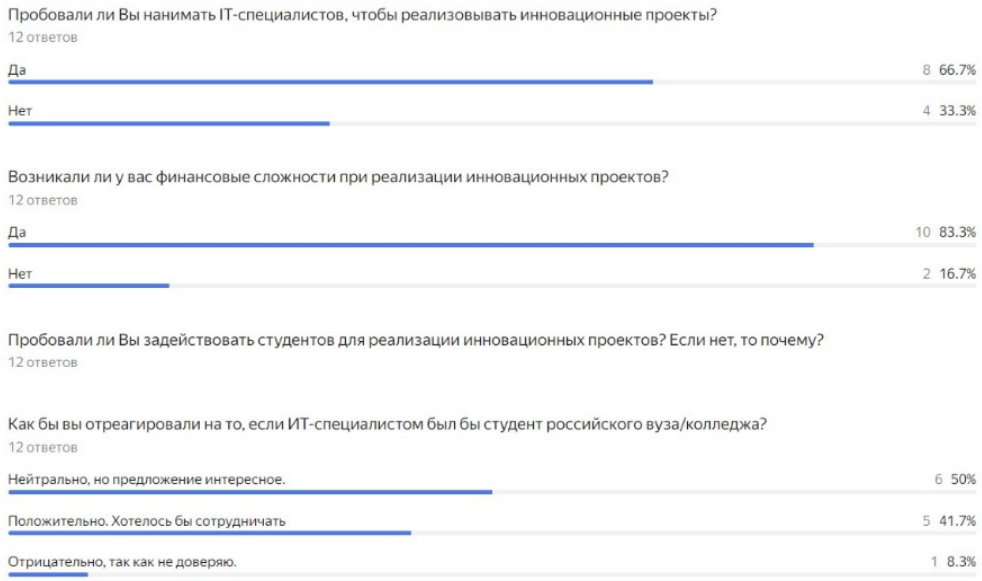


Рис. 3 Опрос в СО НКО. Часть вторая

Из общего мнения СО НКО сложилась позиция, что многие СО НКО в составе 91,7% уже сейчас готовы вступить в диалог со студентами при разработке СО НКО, другие 8,3% высказались по поводу сомнительного опыта в данном сотрудничестве.

Результаты третьей части опроса представлены на рисунке 4.

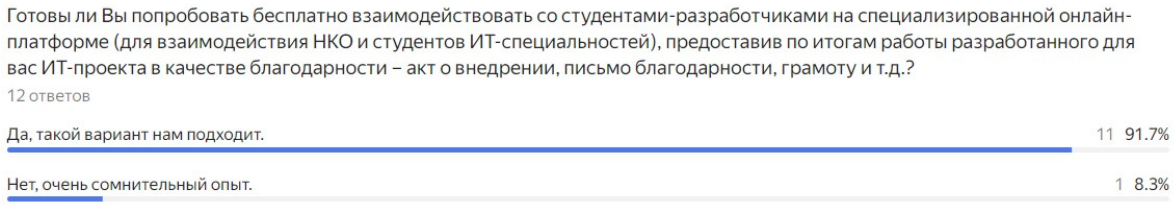


Рис. 4 Опрос в СО НКО. Часть третья

Таким образом, можно сделать вывод, что СО НКО проявляют высокий интерес к внедрению инноваций, однако сталкиваются с рядом сложностей, в том числе финансового характера. Вместе с тем, существует потенциал для сотрудничества СО НКО и студентов в сфере IT-разработок.

Анализ ответов СО НКО и студентов российских вузов выявил необходимость определить понятия «студенческий стартап» и «инновации в НКО». Для этого была проведена работа с научной литературой, чтобы углубить понимание этих терминов.

В научной статье «Понятие и особенности стартапа» автором Соболевым С.С. приводится понятие Эрика Риса, который трактует студенческий стартап, как «организацию, сформированную для создания продукта или услуги, которая в условиях высокой неопределенности способна найти воспроизводимую и масштабируемую бизнес-модель для быстрого роста с помощью эффективно-организованной команды» [4]. Из этого понятия следует, что данное определение обосновывает стартап, как компанию, которая ищет новый путь к успеху в условиях неизвестности, используя инновации и эффективное управление.

Также по мнению кандидата экономических наук Серякова В.А., стартап — это компания, которая создана для поиска бизнес-модели, основанной на технологических инновациях, которую можно многократно применить в разных сферах, обеспечивая постоянный рост [5]. То есть Серякова В.А. видит стартап как компанию, которая не просто решает определенную проблему, а создает новый и устойчивый бизнес, основанный на инновациях и способный расти и развиваться в разных направлениях.

В научной работе кандидата технических наук Бондарчук М.М., кандидат технических наук, определяет стартап как компанию, которая только начинает свой путь и работает над созданием чего-то принципиально нового - продукта или услуги [6]. Стартапы, как правило, фокусируются на инновациях, то есть на разработке решений, которые могут изменить текущую ситуацию на рынке. Их цель - предложить что-то уникальное и новое, что может быть интересным для клиентов.

Изучив определения разных авторов, сформировано свое понимание стартапа в контексте текущего научного исследования, в котором стартап - это группа студенческих команд или отдельных авторов студенческих команд, разрабатывающих инновационные решения с помощью информационных технологий и представляющих потенциальный интерес для СО НКО, которым нужны новые инновационные решения.

Для оптимизации между СО НКО и студентами IT-разработчиками в рамках текущего научного исследования разрабатывается специальный онлайн-портал, который позволяет СО НКО и стартапам общаться друг с другом, обмениваться информацией и создавать новые проекты.

Планируется, что СО НКО будут делиться со студентами своими ресурсами и опытом в социальной работе, а студенческие команды будут разрабатывать инновационные решения для улучшения работы в СО НКО. За ра-

боту студентам будут предоставлены поощрения за свой вклад в развитие деятельности СО НКО в виде акта о внедрении, грамоты, благодарности или финансовое содействие в поддержке научных конференций или публикаций.

Концепция «инновации» лежит в основе современных представлений о функционировании СО НКО. В понимании российских ученых, инновации трактуются, как «эффективные инструменты решения сложных социальных задач» [7]. Применение решений, основанных на инновационных подходах в СО НКО связано с улучшением автоматизации деятельности в СО НКО.

Инновации в СО НКО способствуют расширению аудитории, ускоренному обмену информацией, эффективному сбору и анализу данных, а также повышению прозрачности и открытости деятельности организации.

Согласно исследованию Кондратьевой М.Н. и Комахиной А.В., рост темпов внедрения инновационных технологий в России в последние годы, стимулированный государственной поддержкой, привел к тому, что СО НКО также стали адаптировать свою деятельность к цифровой среде [8].

Поэтому под идеей научного исследования, описываемого в текущей статье «инновация» обозначена, как разработка специализированной онлайн-платформы, координирующей взаимодействие СО НКО и студентов IT-направлений в части разработкой инновационных решений, таких как мобильные приложения, веб-сайты и прочие программы.

Анализ научной литературы позволил сформировать ключевые понятия, которые стали основой для проектирования концепции онлайн-сервиса. Использование бизнес-моделей IDEF0, IDEF3 и DFD повлияло на визуализацию процессов работы сервиса, определив его ключевые функции и взаимодействия между различными элементами системы.

Диаграмма IDEF0, описывающая структурное описание разработки онлайн-портала готовых студенческих IT стартапов для СО НКО представлена на рисунке 5 и рисунке 6.

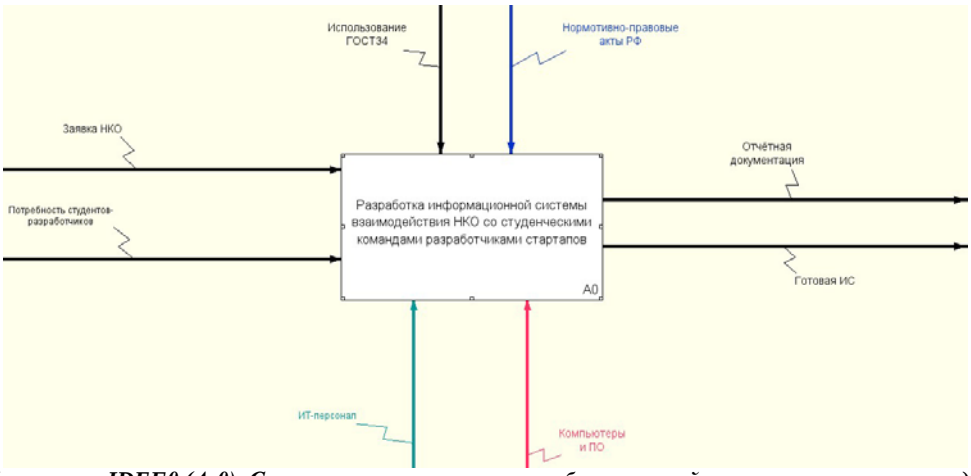


Рис. 5. Диаграмма IDEF0 (A-0). Структурное описание разработки онлайн-портала готовых студенческих IT стартапов для СО НКО

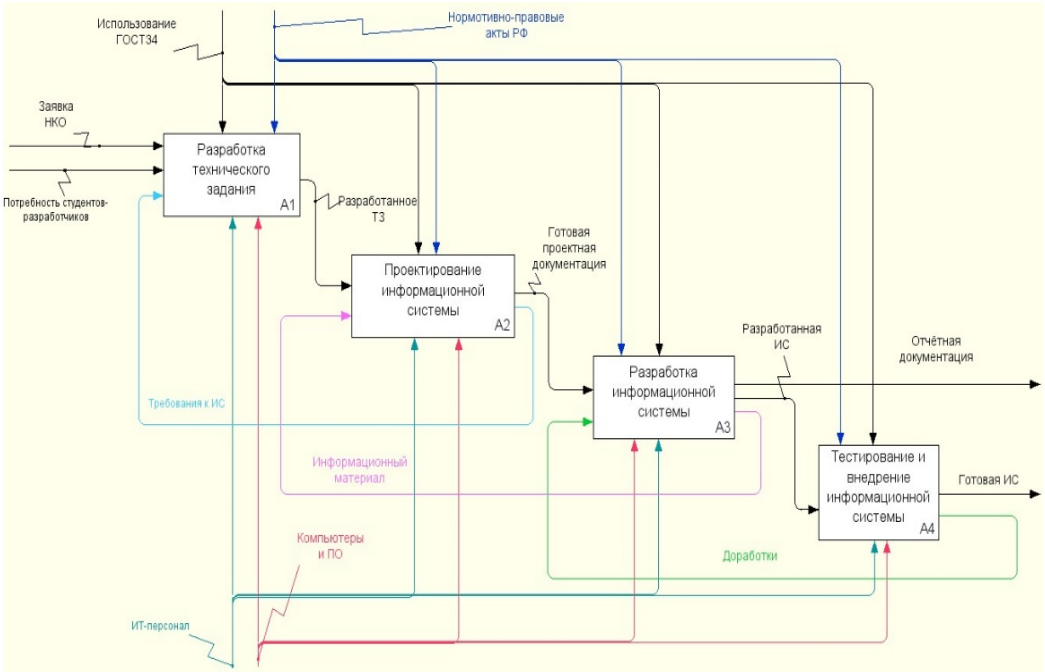


Рис. 6. Диаграмма IDEF0 (A-1). Структурное описание разработки онлайн-портала готовых студенческих IT-стартапов для СО НКО

Проектируемая диаграмма позволяет представить процесс разработки системы, выделяя ключевые этапы и взаимодействия между различными процессами, происходящими на этапе формирования IT-разработки [9].

Следующая диаграмма, проектируемая для разработки онлайн-портала, является IDEF3 [10] и представлена на рисунке 7.

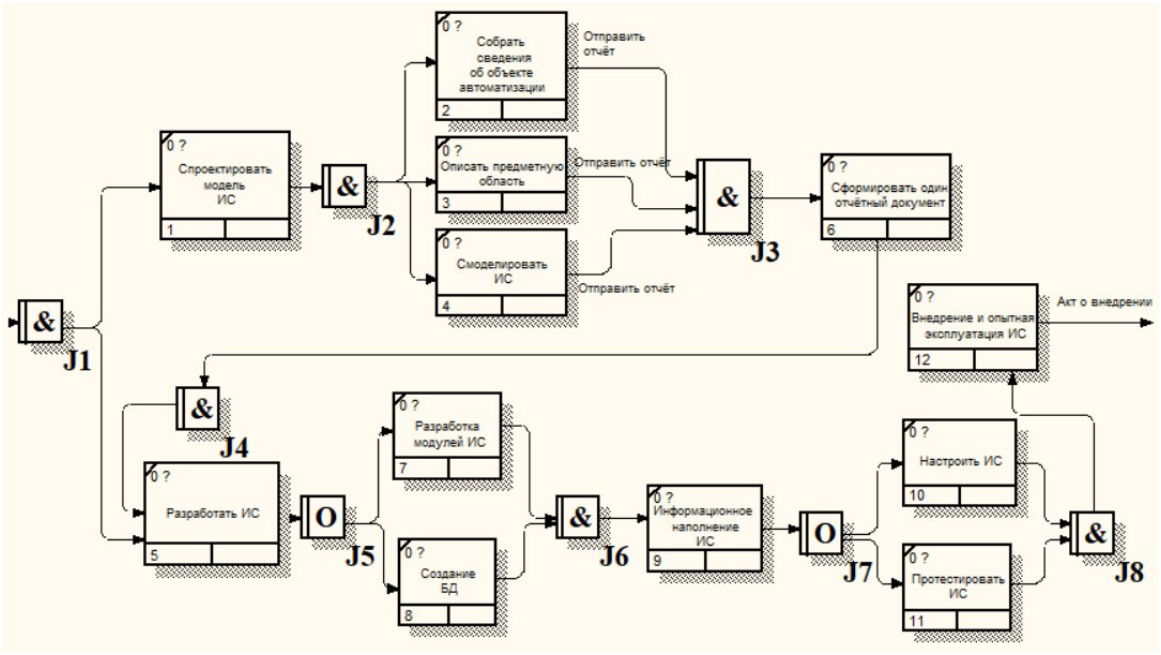


Рис. 7. Нотация IDEF3 для онлайн-портала готовых студенческих IT- стартапов для СО НКО

Методология IDEF3 использует иерархическую систему диаграмм. Каждая диаграмма представляет собой набор прямоугольников, отображающих работы или процессы разработки онлайн-портала, а стрелки показывают движение данных между ними [11].

Еще одной диаграммой, спроектированной в процессе исследования, является диаграмма DFD, основанная на графическом представлении потока данных [12, 13]. Её изображение представлено на рисунке 8.

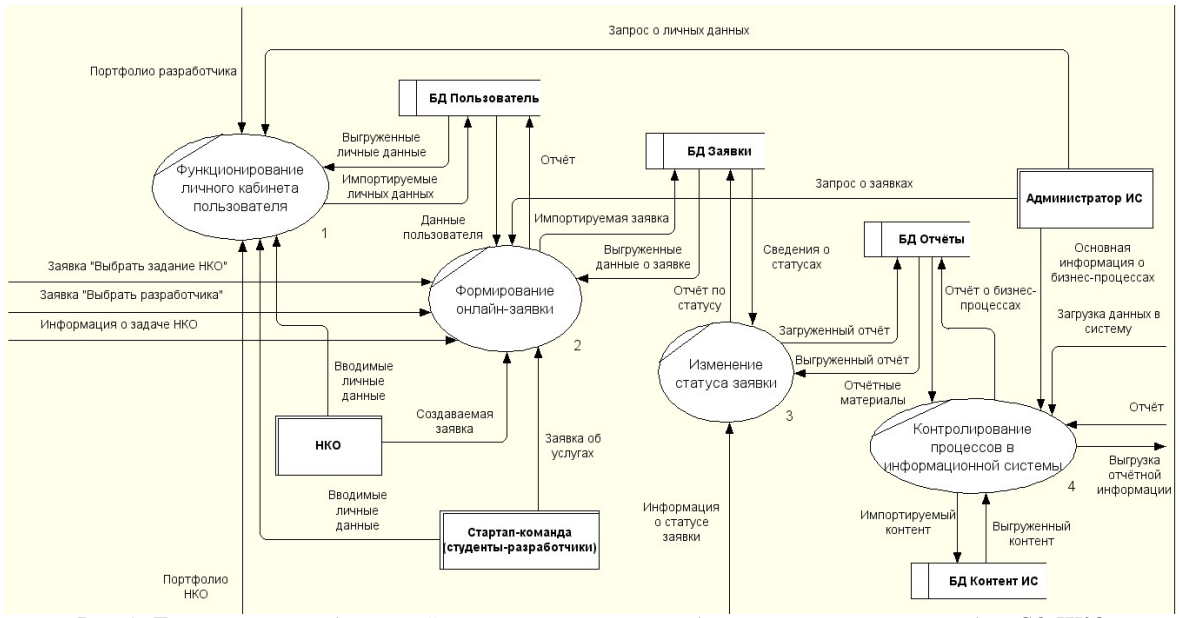


Рис. 8. Диаграмма DFD для онлайн-портала готовых студенческих IT-стартапов для СО НКО

Диаграмма DFD позволяет четко представить, как функционирует система взаимодействия НКО со студенческими командами разработчиков стартапов. Она помогает разбить сложные процессы на более простые компоненты, что позволяет определить ключевые требования к системе. Таким образом, диаграмма DFD способствует более эффективному планированию и проектированию онлайн-ресурса, обеспечивая его соответствие необходимым требованиям и оптимизируя использование имеющейся информации.

В целом применение бизнес-моделей IDEF0, IDEF3 и DFD позволило обеспечить более эффективное планирование и проектирование онлайн-портала, соответствие его необходимым требованиям и оптимизировать использование имеющейся информации.

Таким образом, разработка онлайн-портала готовых студенческих IT-стартапов для СО НКО представляет собой перспективное решение для ускорения инновационного развития некоммерческого сектора в России. Анализ ситуации показывает, что несмотря на активную поддержку государства, СО НКО продолжают испытывать нехватку ресурсов и специалистов в сфере IT. Создание онлайн-портала, который соединит СО НКО с готовыми студенческими IT-решениями, поможет решить несколько проблем - упростит доступ к инновациям, повысит эффективность сотрудничества, обеспечит более эффективное взаимодействие между СО НКО и студенческими командами, стимулирование развития IT-компетенций студентов.

Список литературы

1. В фокусе внимания — уровень цифровых компетенций НКО // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» [Электронный ресурс]. URL: https://grans.hse.ru/news/962100368.html (дата обращения: 29.09.2024).
2. НКО: новые реалии — новые решения // Перейти в доклад о состоянии гражданского общества в российской федерации [Электронный ресурс]. URL: https://report2023.oprf.ru/ru/ngos-new-realities-new-solutions.html (дата обращения: 29.09.2024).
3. В вузах страны запустили программу «Обучение служением» // Министерство науки и высшего образования Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/molodezhnaya-politika/72616 / (дата обращения: 29.09.2024).
4. Соболев С.С. Понятие и особенности стартапа // Теория и практика современной науки. 2017. №12(30). С. 625-6233.
5. Серяков В.А., Казакова Т.Д. Руководство студенческими дизайн проектом в виде стартапа // Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: Педагогические науки.
6. Бондарчук М.М. Стартап-деятельность в вузе // Современное педагогическое образование № 4. 2023. С. 14-17.
7. Антропова Ю.Ю., Коробейникова А.П. Роль социально ориентированных некоммерческих организаций в развитии инноваций в социальной сфере региона // Дискуссия. Журнал научных публикаций. 2015. №11(63). С. 64-69.
8. Кондратьева М., Комахина А. Цифровизация: исследование основных терминов, Экономика и управление: научно-практический журнал, № 3 (165), 2022.
9. Госстандарт России «Методология функционального моделирования idef0. Руководящий документ.» // Российская газета. 2000.
10. Основы IDEF3 // Библиотека управления [Электронный ресурс]. URL: https://www.cfin.ru/vernikov/idef/idef3.shtml (дата обращения: 29.09.2024).
11. Описание нотации IDEF3 // Блог [Электронный ресурс] URL: https://www.trinion.org/blog/opisanie-notacii-idef3 (дата обращения: 29.09.2024).
12. DFD (Data Flow Diagram) Диаграммы — зачем они нужны и какие бывают // Хабр [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/668684 (дата обращения: 29.09.2024).
13. Использование DFD: как описать движение данных в бизнес-процессах // Systems. Education [Электронный ресурс] URL: https://systems.education/data-flow-diagrams (дата обращения: 29.09.2024).

Судьина Дарья Олеговна, магистр, sudina_dasha@mail.ru, Россия, Москва, Московский государственный университет технологий и управления МГУТУ им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет),

Петросян Лусинэ Эдуардовна, канд. экономн. наук, доцент, mail@mfmgutu.ru, Россия, Москва, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), Российский технологический университет МИРЭА

OPTIMIZING INTERACTION WITH SO NGOs AND STUDENT IT-STARTUPS THROUGH AN ONLINE PLATFORM

D.O. Sudina, L.E. Petrosyan

This article presents an analysis of the current state of innovative development in socially oriented non-profit organizations (hereinafter referred to as SO NPOs). Special attention is paid to the role of interaction between Russian university students in promoting innovation in SO NPOs, particularly in the field of information technology. A study was conducted, including a survey of SO NPOs and students from Russian universities, aimed at identifying the practical significance and prospects of such cooperation. The conceptual apparatus is analyzed. The concept of implementing an online portal for ready-made student IT startups for SO NPOs is described.

Key words: student startup, IT- startup, development teams, innovation in SO NPOs, innovative development, innovative solution, digitalization, non-profit sector, online portal, optimization.

Sudina Darya Olegovna, master's, sudina_dasha@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow State Technological University (MSTU) named after K.G. Razumovsky (First Cossack University),

Petrosyan Lusine Eduardovna, candidate of economic sciences, docent, mail@mfmgutu.ru, Russia, Moscow, Moscow State Technological University (MSTU) named after K.G. Razumovsky (First Cossack University), Russian Technological University MIREA

УДК 004.891.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-720-721

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИИ RETRIEVAL-AUGMENTED GENERATION ДЛЯ КОРПОРАТИВНЫХ АССИСТЕНТОВ

А.В. Шмат

Статья посвящена анализу использования больших языковых моделей и технологии Retrieval-Augmented Generation в корпоративных ассистентах, применяемых для автоматизации задач и поддержки сотрудников. Подробно рассматриваются возможности LLM в корпоративной среде, включая такие задачи, как автоматизация рутинных процессов, помощь в адаптации сотрудников, поддержка принятия решений и управление документами. Также описаны ключевые вызовы, связанные со снижением точности моделей при отсутствии актуализации данных и решением этой проблемы путем использования технологии Retrieval-Augmented Generation для извлечения актуальных данных из актуальных баз знаний. Рассматриваются стадии развития данной технологии и альтернативный способ повысить точность ответов большой языковой модели, называемый тонкая настройка. Также в статье рассмотрено, как технология Retrieval-Augmented Generation влияет на точность ответов трех популярных нейронных сетей и приведены примеры успешных внедрений больших языковых моделей с использованием технологии Retrieval-Augmented Generation.

Ключевые слова: большая языковая модель, генерация с дополненной выборкой, корпоративный ассистент.

За последние несколько лет технологии искусственного интеллекта и обработки естественного языка (NLP) достигли значительных успехов, что позволило расширить возможности больших языковых моделей и внедрить их в корпоративные процессы. С помощью этих моделей компании получили возможность автоматизировать задачи, требующие понимания и генерации текста на уровне, почти не отличимом от человеческого, что открывает новые перспективы для повышения производительности и оптимизации бизнес-процессов. В корпоративной среде LLM активно используются для решения рутинных задач, улучшения взаимодействия между отделами, поддержки клиентов, анализа данных и упрощения документооборота.

Тем не менее, применение LLM в корпоративных ассистентах сталкивается с рядом вызовов. Одной из проблем является склонность моделей к «галлюцинациям» — выходным данным, которые синтаксически и семантически правильны, но не связаны с реальностью и основаны на ложных предположениях [1]. Другой важный аспект — недостаток актуальности, так как модель часто не имеет доступа к свежей информации, особенно если она не обновлялась с момента обучения. Эти факторы ограничивают эффективность LLM, особенно при решении задач, требующих достоверности и актуальности данных.

Одним из перспективных решений этих ограничений является технология Retrieval-Augmented Generation (RAG), в русской литературе она называется генерация с дополненной выборкой. Данная технология интегрирует доступ к внешним базам знаний, что позволяет LLM дополнительно извлекать и использовать актуальные данные из корпоративных и внешних источников. Это позволяет LLM обеспечивать более точные и актуальные ответы, минимизируя вероятность ошибок и повышая качество обслуживания в корпоративной среде.

Материал. Корпоративные ассистенты, основанные на LLM, могут выполнять широкий спектр задач, которые помогают сотрудникам оптимизировать рабочие процессы и ускорить принятие решений. Ниже представлены возможные сценарии использования корпоративного ассистента:

Автоматизация повседневных процессов. Одной из ключевых задач корпоративного ассистента является автоматизация рутинных процессов. Это может включать управление расписанием, бронирование переговорных комнат, отправку уведомлений и выполнение простых запросов, таких как заказ канцелярии или формирование отчетов. Использование LLM позволяет упростить эти процессы, так как ассистенты могут не только выполнять команды, но и понимать сложные инструкции на естественном языке.

Поиск и представление информации. В современных корпорациях сотрудники сталкиваются с большим объемом информации, которая хранится в различных форматах и системах. Корпоративный ассистент на основе LLM может предоставлять релевантную информацию по запросу. Например, ассистент может помочь найти данные о продукте, информацию о корпоративной политике или актуальные проекты.

Адаптация новых сотрудников. Процесс адаптации новых сотрудников (онбординг) может быть сложным и длительным. Корпоративный ассистент на основе LLM может значительно упростить этот процесс, предоставляя информацию по внутренним процессам, правилам, а также направляя новых сотрудников к обучающим ресурсам. Это снижает нагрузку на отдел кадров и помогает новым сотрудникам быстрее адаптироваться.

Управление документами. Ассистенты на базе LLM могут автоматизировать процессы, связанные с управлением документами, такие как их создание, редактирование и согласование. Например, ассистент может сгенерировать черновик документа на основе существующих шаблонов и предоставленных данных, что существенно ускоряет рабочий процесс.

IT-поддержка. Часто сотрудники сталкиваются с техническими вопросами, решение которых требует обращения в отдел IT. Ассистент, основанный на LLM, может служить первой линией технической поддержки, отвечая на базовые вопросы, связанные с использованием корпоративных систем, установкой программного обеспечения и решением типичных проблем. Это снижает нагрузку на IT-отдел и ускоряет процесс решения проблем для сотрудников.

Все эти сценарии использования корпоративных ассистентов предоставляют значительные преимущества. Однако внедрение LLM в корпоративные ассистенты связано с рядом негативных факторов, которые необходимо учитывать при разработке и интеграции таких систем:

− Конфиденциальность. Корпоративные ассистенты могут обрабатывать чувствительную информацию, такую как персональные данные сотрудников, финансовые отчеты или внутренние документы компании. Это требует строгого соблюдения стандартов безопасности и защиты данных, включая шифрование информации и соответ-

ствие международным и региональным требованиям конфиденциальности.

– Актуальность данных. Одним из ключевых аспектов работы корпоративных ассистентов является актуальность предоставляемой информации. В корпоративных базах данных информация должна регулярно обновляться, чтобы LLM мог предлагать актуальные и достоверные ответы. В противном случае система может выдавать устаревшие или некорректные данные, что может привести к негативным последствиям для бизнеса [2].

– Галлюцинации LLM. Одна из проблем использования LLM заключается в их склонности к генерации так называемых "галлюцинаций". В корпоративной среде это может быть особенно критично, так как неправильная информация может привести к серьезным ошибкам [2].

– Сложность обучения. Для того чтобы ассистент мог эффективно работать в корпоративной среде, необходимо обучение модели на специфичных данных компании. Этот процесс может занять значительное время и потребовать больших ресурсов, особенно для крупных компаний с обширными базами данных и сложными внутренними процессами [2].

– Интеграция с устаревшими системами. Многие компании продолжают использовать устаревшие корпоративные системы, которые могут быть плохо совместимы с современными решениями на базе AI. Это создает дополнительные сложности при интеграции LLM в существующую инфраструктуру компании и может требовать доработки или замены устаревших систем [2].

Один из способов повысить эффективность корпоративных ассистентов на основе LLM — это интеграция их с корпоративными базами данных с использованием технологии Retrieval-Augmented Generation. Эта технология позволяет LLM не только генерировать ответы на основе своих внутренних параметров, но и обращаться к внешним источникам данных для получения актуальной информации [3]. Ниже на рисунке 1 представлено различие в ответе ассистента с использованием RAG и без него. Синие стрелки отображают работу ассистента без использования генерации с дополненной выборкой: запрос пользователя, генерация ответа. Черные стрелки отображают работу ассистента и использованием генерации с дополненной выборкой: пользовательский запрос, процесс индексации информации из документов и баз знаний, извлечение релевантных данных, генерация ответа.

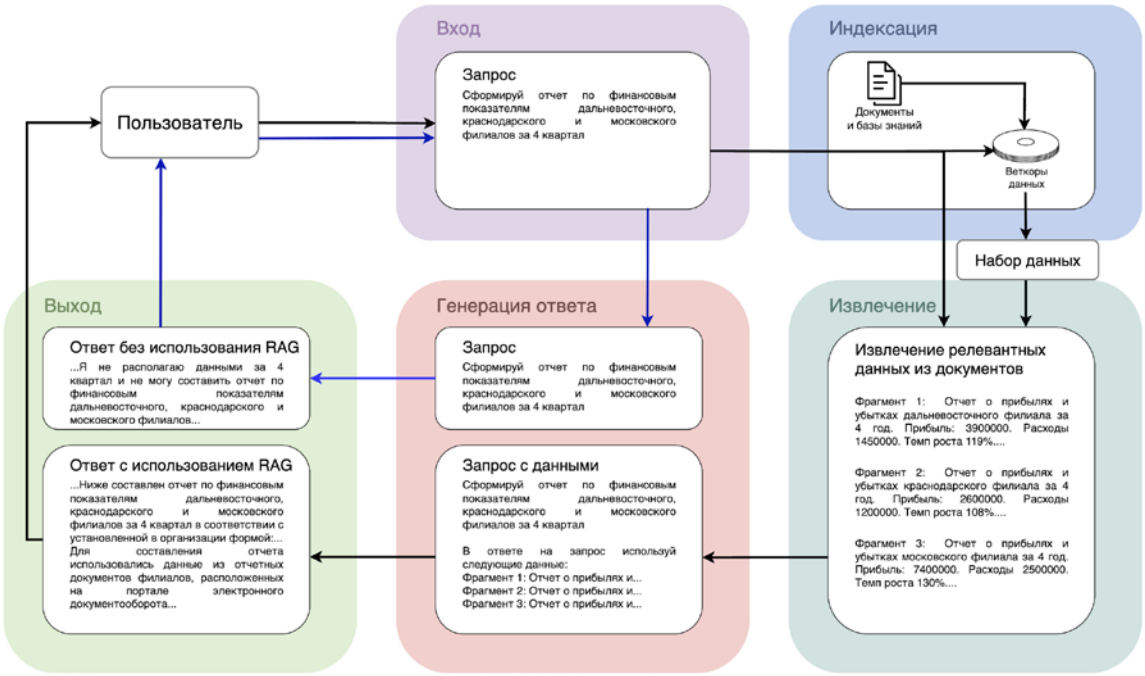


Рис. 1. Возможный сценарий применения RAG и без него

Технология генерации с дополненной выборкой заключается в том, что модель LLM дополняется механизмом поиска и извлечения информации из внешних баз данных. При получении запроса от пользователя, ассистент не только использует свои знания, полученные при обучении, но и ищет релевантные данные в корпоративных или внешних базах. Это позволяет значительно повысить точность и актуальность предоставляемых ответов.

Теоретические основы. Парадигма Retrieval-Augmented Generation прошла несколько стадий развития, начиная с Наивного RAG и заканчивая Модульным RAG [3].

Наивный RAG — это первая версия методологии, которая возникла вскоре после появления LLM. Этот подход основан на трёх ключевых процессах: индексация, поиск и генерация. В рамках этого подхода текстовые данные в различных форматах преобразуются в текстовые фрагменты, которые кодируются в векторы и сохраняются в векторной базе данных [4]. Ниже на рисунке 2 изображен процесс работы Наивного RAG.

Описание работы Наивного RAG:

Индексация данных. Документы, хранящиеся в разных форматах, таких как PDF, HTML, или текстовые файлы, преобразуются в текстовые фрагменты. Эти фрагменты кодируются в виде векторных представлений с помощью специальных алгоритмов и сохраняются в векторной базе данных.

– Извлечение информации. Когда пользователь вводит запрос, система преобразует его в векторное представление и вычисляет схожесть запроса с фрагментами в базе данных. На основе этого производится отбор наиболее релевантных фрагментов.

– Обогащение запроса. Запрос пользователя дополняется информацией, найденной в базе знаний.

− Генерация ответа. После того как релевантные фрагменты найдены, они объединяются с запросом пользователя, и система на основе этих данных генерирует осмысленный ответ.

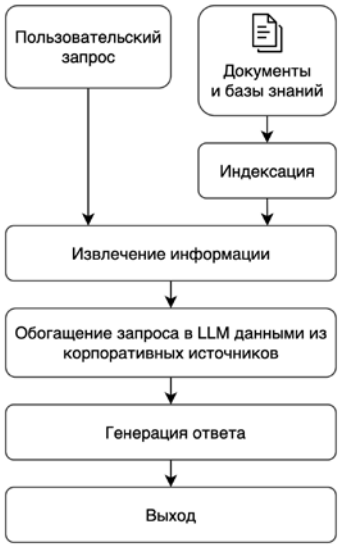


Рис. 2. Наивный RAG

К недостаткам Наивного RAG можно отнести:

1) возможность выбора нерелевантных фрагментов данных или пропуска важной информации;
2) риск того, что модель создаст несуществующий или искаженный контент, что в корпоративной среде может привести к серьезным ошибкам;
3) риск возникновения избыточности ответа и стилистическая согласованность при объединении информации из разных источников.

Продвинутый RAG был разработан для решения проблем, характерных для Наивного RAG. Основные улучшения направлены на повышение точности поиска и обработки данных [5]. Ниже на рисунке 3 изображен процесс работы Продвинутого RAG.



Рис. 3. Продвинутый RAG

Эта версия методологии по сравнению с Наивным RAG включает два ключевых улучшения:

− Предварительное извлечение. В продвинутом RAG улучшается структура индексации данных и сами запросы для поиска. Это позволяет более точно находить нужную информацию. Например, можно использовать метаданные для фильтрации информации, стратегию "скользящего окна" для анализа более длинных текстов и методы расширения запросов для более точного поиска.

− Пост-извлечение. Этот этап включает повторное ранжирование найденных фрагментов данных и сокращение объема контекста для улучшения качества предоставляемой информации. Это помогает устранить дублирование и повысить релевантность ответа.

Продвинутый RAG более эффективно решает проблемы, связанные с искажением информации, хотя всё ещё может столкнуться с трудностями при обработке крайне сложных или неоднозначных запросов [3].

Модульный RAG представляет собой еще более гибкую и адаптивную систему. Он добавляет новые компоненты, которые могут выполнять специализированные функции для повышения точности и релевантности ответов:

− Модуль поиска. Эта компонента отвечает за поиск в нескольких источниках данных одновременно, что позволяет ассистенту предоставлять более исчерпывающую информацию.

− Модуль памяти. Позволяет системе "запоминать" предыдущие запросы и ответы, что помогает более точно отвечать на последующие вопросы, особенно если они связаны с предыдущими темами.

− Модуль маршрутизации. Оптимизирует процесс поиска информации, направляя запросы в наиболее релевантные источники данных.

Это делает систему более универсальной и приспособленной к различным сценариям использования.

Модульный RAG также предлагает новые стратегии поиска и генерации ответов, которые делают процесс более эффективным и точным:

− Rewrite-Retrieve-Read. В этой стратегии LLM используется для исправления или переформулирования запроса перед его отправкой на поиск. Это повышает качество запроса и позволяет системе находить более релевантную информацию.

− Generate-Read. В этой стратегии вместо классического поиска используется сгенерированный контент. Это может быть полезно, если прямой поиск не даёт результата или запрос является слишком обобщённым.

Внедрение технологии RAG в корпоративных ассистентах с применением LLM приносит множество преимуществ, повышающих точность и эффективность работы системы:

1) позволяет решить проблему "галлюцинаций", поскольку ассистент с её использованием может извлекать релевантные данные из внешних источников;
2) предоставляет доступ к самым последним данным, что особенно актуально для корпоративной среды, где информация постоянно обновляется.

Используя модули поиска, RAG может интегрироваться с различными источниками корпоративной информации, включая базы данных, документы, внутренние системы управления знаниями и другие ресурсы. Это делает ассистента универсальным инструментом, который может обрабатывать запросы из разных сфер деятельности компании.

Несмотря на очевидные преимущества использования LLM и RAG в корпоративных ассистентах, подобные решения, доведенные до продуктивного использования, пока встречаются крайне редко. Связано это с тем, что внедрение таких систем сопряжено с рядом сложностей:

− Проблемы с интеграцией. Многие компании используют устаревшие или специализированные информационные системы, которые могут быть плохо совместимы с современными технологиями AI. Чтобы корпоративный ассистент мог эффективно работать, необходимо продуманное планирование интеграции с существующими системами, а также разработка интерфейсов, которые будут поддерживать взаимодействие между системами.

− Разрешение конфликтов и некорректной информации. При обработке данных из разных источников ассистент может столкнуться с конфликтной или противоречивой информацией. В таких случаях необходимы механизмы для выявления и разрешения конфликтов, а также для проверки достоверности информации [6].

Более распространенным способом повысить качество ответов LLM является fine-tuning (тонкая настройка). Fine-tuning — это процесс дополнительного обучения заранее LLM на конкретном наборе данных, обычно с более узкой задачей или в определённой области. Обычно LLM первоначально обучаются на огромных корпусах разнообразных текстовых данных, осваивая общие структуры языка, лексику и концепции. Fine-tuning адаптирует эту модель для улучшения работы в специализированных задачах за счёт дополнительного обучения на данных, относящихся к нужной области. Процесс fine-tuning предполагает следующие шаги [7-8]:

− Подготовка данных. Набор данных для fine-tuning, как правило, меньше, чем данные, используемые для первичного обучения, и он специализирован для конкретной задачи.

− Дополнительное обучение модели. LLM дополнительно обучается на этих специализированных данных, корректируя свои параметры и веса для лучшего понимания конкретной области.

− Валидация. Производительность модели проверяется на отдельном тестовом наборе данных, чтобы убедиться, что она хорошо обобщает новые знания в данной области.

− Развёртывание. Настроенная модель используется для решения специфических задач, таких как поддержка клиентов, медицинская диагностика или создание юридических документов.

Fine-tuning особенно эффективен для задач, где требуется точное понимание специфичной области. Например, модель, настроенная для работы с юридическими текстами, будет превосходить общие модели при интерпретации законов или подготовке юридических документов, так как она специализируется на юридической терминологии и дискурсе.

На основании вышеизложенного можно выделить различия между fine-tuning и RAG, представленные в таблице 1.

Fine-tuning и RAG являются мощными инструментами, каждый из которых лучше всего подходит для разных сценариев использования. Fine-tuning идеально подходит для задач, требующих глубоких, специализированных знаний, где информация редко изменяется и модель может быть обучена на статичных данных. В то же время, RAG показывает свою эффективность в задачах, где важен доступ к постоянно обновляемым знаниям и внешним источникам данных. RAG обеспечивает гибкость и точность, снижая вероятность использования устаревших дан-

ных, что критически важно корпоративного ассистента. Точность ответа оценивалась на основании соотношения правильных ответов ко всем запросам.

Различия механизмов fine-tuning и RAG

Критерий	Fine-tuning	RAG
Механизм хранения знаний	Знания хранятся в параметрах модели после обучения. Модель генерирует ответы на основе "памяти" о данных	Модель извлекает актуальные данные из внешних источников в режиме реального времени при создании ответа
Гибкость модели	Модель становится специализированной, но фиксированной и ограниченной знаниями, усвоенными при обучении	Предоставляет гибкость, так как позволяет извлекать актуальную информацию для задач, требующих обновлений
Масштабируемость	Для добавления новых знаний требуется повторное обучение, что может быть ресурсоёмким.	Внешние базы данных могут обновляться независимо от модели, что упрощает масштабирование без повторного обучения
Задержка	Ответы генерируются быстрее, так как нет процесса извлечения данных	Присутствует небольшая задержка из-за необходимости извлечения данных перед генерацией ответа
Галлюцинации и достоверность	Может создавать "галлюцинации" (правдоподобные, но неверные ответы), если данные неполные или устаревшие.	Снижает вероятность галлюцинаций, так как ответы основываются на актуальных извлечённых данных

Благодаря особенностям работы данная технология стала важным компонентом в успешных внедрениях LLM в различных бизнес-сценариях. Компания PepsiCo успешно интегрировала LLM с RAG для решения задач, связанных с оптимизацией цепочек поставок и улучшением рыночного анализа. Технология Retrieval-Augmented Generation помогает анализировать свежие данные о поставках, хранении, логистике и спросе, извлекая их из корпоративных баз и внешних источников, что позволяет принимать более точные решения в реальном времени [9]. Ниже на рисунке 4 изображено верхнеуровневое представление работы RAG в PepsiCo.

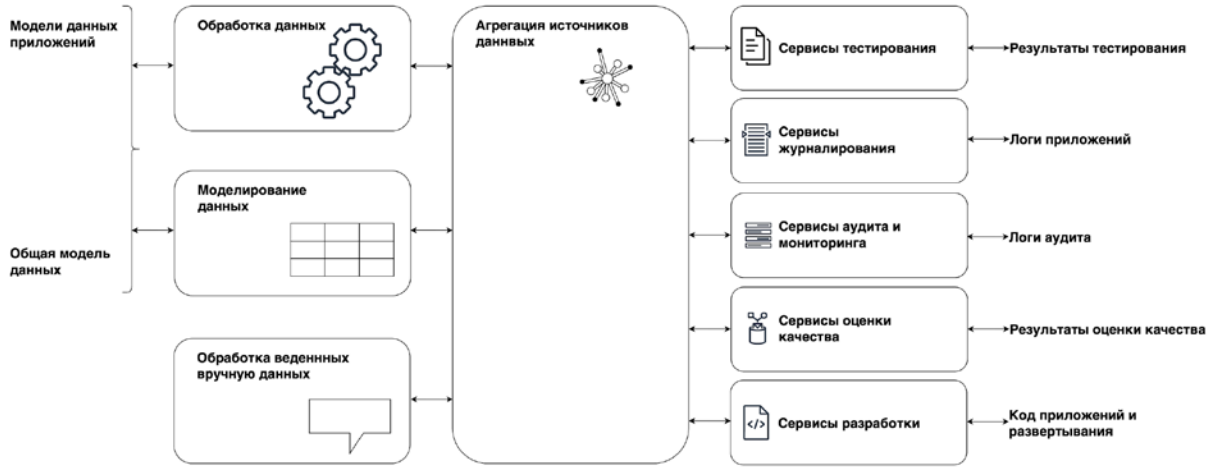


Рис. 4. Верхнеуровневое представление работы RAG в PepsiCo

JetBlue использует RAG для создания эффективной платформы обслуживания клиентов, интегрированной с корпоративным сайтом авиакомпании. Модель LLM с поддержкой технологии Retrieval-Augmented Generation помогает автоматизировать ответы на запросы клиентов и повышать качество обслуживания, предоставляя актуальную информацию из множества внешних источников данных [9].

Компания novita.ai интегрировала RAG в свои продукты, что позволило улучшить качество генерации контента для клиентов за счёт использования релевантной информации, извлекаемой из их баз знаний. Благодаря RAG, novita.ai автоматизировала процесс обработки запросов к внешним документам и генерации контекстных ответов на основе этих данных [10].

Методы исследования. Для проверки эффективности работы технологии генерации с дополненной выборкой были рассмотрены три модели: YandexGPT, Gigachat, GPT-4 [11]. В качестве инструментов, реализующих логику RAG, использовались компоненты Langchain [12]. Корпус текстов состоял из данных по затратам на облачную инфраструктуру разных провайдеров, включая финансовые данные, такие как стоимость разных услуг и ресурсов, скидках и предложениях. Вопросы для запросов к LLM включали расчет прогнозируемой стоимости проектов, а также различные сравнительные характеристики провайдеров. Такие запросы могут отражать один их сценариев использования корпоративного ассистента на базе большой языковой модели. В качестве оценки ответов использовалась метрика точности как процент правильно данных ответов, соответствующих запросу.

Результаты исследования. Точность модели YandexGPT без дополнительной выборки из баз знаний составила 63%, тогда как с актуальными данными из собранного корпуса точность составила 79%. Для модели GPT-4 точность без дополнительной выборки составила 67%, а с актуальными данными точность выросла до 84%. Точность модели Giga chat без дополнительной выборки составила 64%, с актуальными данными точность составила 80%. Рисунок 5 демонстрирует увеличение точности языковых моделей при использовании RAG.

На рассмотренном примере технология генерации с дополненной выборкой заметно повышает точность языковых моделей, увеличивая ее на 15–17% за счет доступа к актуальным внешним данным. Такое улучшение особенно значимо для задач, требующих обновленной и достоверной информации.

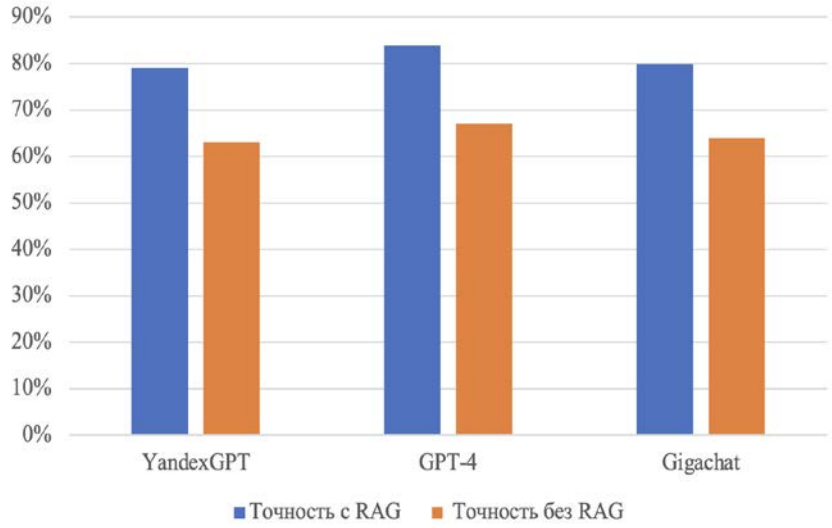


Рис. 5. Увеличение точности языковых моделей при использовании RAG

Заключение. Корпоративные ассистенты, основанные на больших языковых моделях и технологии RAG, представляют собой мощный инструмент, способный значительно повысить эффективность работы компаний. Они могут автоматизировать рутинные процессы, улучшить взаимодействие сотрудников с корпоративной информацией и сократить время на принятие решений.

Однако успешное внедрение таких ассистентов требует тщательного планирования и решения ряда важных вопросов, таких как адаптация моделей под специфику компании и интеграция с существующими системами. Технология RAG позволяет повысить точность и актуальность ответов, что делает корпоративные ассистенты особенно полезными в условиях изменяющегося бизнес-ландшафта.

В перспективе можно ожидать дальнейшего развития и адаптации технологий LLM и RAG, что сделает их ещё более эффективными и универсальными для применения в различных корпоративных сферах. Это позволит компаниям улучшить внутренние процессы, повысить производительность и адаптироваться к быстро меняющимся условиям глобального рынка.

Список литературы

1. Саджид Х. Что такое LLM-галлюцинации? Причины, этическая проблема и профилактика [Электронный ресурс] URL: https://www.unite.ai/ru/what-are-llm-hallucinations-causes-ethical-concern-prevention (дата обращения: 10.05.2024).

2. Шульгин Д. Проблемы Больших Языковых Моделей (LLM). Дискуссия на SMARTDEV 2023 [Электронный ресурс]. URL: https://bytemag.ru/problemy-bolshih-yazykovyh-modelej-llm-diskussiya-na-smartdev-2023-28752 (дата обращения: 10.05.2024).

3. Yunfan Gao, Yun Xiong, Xinyu Gao, Kangxiang Jia, Jinliu Pan, Yuxi Bi, Yi Dai, Jiawei Sun, Meng Wang, Haofen Wang Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey [Электронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2312.10997 (дата обращения: 10.05.2024).

4. Новиков И. Архитектура RAG: полный гайд [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/raft/articles/791034 (дата обращения: 10.05.2024).

5. Новиков И. Архитектура RAG: часть вторая — Advanced RAG [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/raft/articles/818781 (дата обращения: 10.05.2024).

6. Siyun Zhao, Yuqing Yang, Zilong Wang, Zhiyuan He, Luna K. Qiu, Lili Qiu Retrieval Augmented Generation (RAG) and Beyond: A Comprehensive Survey on How to Make your LLMs use External Data More Wisely [Электронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2409.14924 (дата обращения: 10.05.2024).

7. Кунцев Р. Fine-tuning больших языковых моделей в 2024 году [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/830414 (дата обращения: 10.05.2024).

8. Акимов И. Раскрывая секреты LLM: руководство по основным понятиям больших языковых моделей без хайпа [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/768844 (дата обращения: 10.05.2024).

9. Krause C. PepsiCo and JetBlue: Case Studies in Securing RAG LLM Deployments [Электронный ресурс]. URL: https://cdotimes.com/2024/07/03/pepsico-and-jetblue-case-studies-in-securing-rag-llm-deployments (дата обращения: 10.05.2024).

10. Step-by-Step Tutorial on Integrating Retrieval-Augmented Generation (RAG) with Large Language Models [Электронный ресурс]. URL: https://blogs.novita.ai/step-by-step-tutorial-on-integrating-retrieval-augmented-generation-rag-with-large-language-models (дата обращения: 10.05.2024).

11. Ilin I. Advanced RAG Techniques: an Illustrated Overview [Электронный ресурс]. URL: https://pub.towardsai.net/advanced-rag-techniques-an-illustrated-overview-04d193d8fec6 (дата обращения: 10.05.2024).

12. Build a Retrieval Augmented Generation (RAG) App [Электронный ресурс]. URL: https://python.langchain.com/docs/tutorials/rag (дата обращения: 10.05.2024).

Шмат Алексей Вячеславович, shmat.alexey@yandex.ru, Россия, Москва, Российский технологический университет МИРЭА

APPLICATION OF LARGE LANGUAGE MODELS AND RETRIEVAL-AUGMENTED GENERATION TECHNOLOGY FOR ENTERPRISE ASSISTANTS

A.V. Shmat

The article analyses the use of large language models and Retrieval-Augmented Generation technology in corporate assistants used to automate tasks and support employees. LLM capabilities in the corporate environment are discussed in detail, including such tasks as automation of routine processes, assistance in employee onboarding, decision support and document management. Also described are the key challenges of declining model accuracy in the absence of up-to-date data and how this is addressed by using Retrieval-Augmented Generation technology to extract current data from up-to-date knowledge bases. The stages of development of this technology and an alternative way to improve the accuracy of large language model responses, called fine-tuning, are discussed. The paper also discusses how Retrieval-Augmented Generation technology affects the response accuracy of three popular neural networks and provides examples of successful implementations of large language models using Retrieval-Augmented Generation technology.

Key words: large language model, retrieval-augmented generation, corporate assistant.

Shmat Alexey Vyacheslavovich, shmat.alexey@yandex.ru, Russia, Moscow, Russian Technological University MIREA

УДК 004.891
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-726-727

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРИОРИТЕЗАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ЗАПРОСОВ

И.А. Лобзин

Данная работа посвящена исследованию возможностей автоматизации процесса приоритезации пользовательских запросов. В ней рассмотрены различные решения данного вопроса, включая эвристические подходы и различные методы машинного обучения. Последним в данной работе уделено особое внимание. Также подробно разобраны вопросы подготовки данных, лемматизация, извлечение именованых сущностей и так далее, приведены примеры существующих решений, реализующих указанные подходы.

Ключевые слова: автоматизация, приоритезация, системы Service Desk, пользовательские обращения, обработка естественного языка, NLP.

Одной из важнейших возможностей систем Service Desk является работа с обращениями пользователей. Объём и сложность обработки этих обращений зависит от множества факторов, но как правило перед многими крупными предприятиями рано или поздно встаёт вопрос о необходимости оптимизации работы с запросами [1]. В него же можно включить и приоритезацию: критические проблемы у ключевых клиентов должны решаться как можно скорее – в противном случае, предприятие понесёт финансовые и репутационные издержки.

Как указано выше, приоритет обращения пользователя является важным фактором при обработке большого количества запросов. В общем случае установка корректного приоритета требует анализа обращения специалистом. При установке приоритета такой специалист обычно опирается на ряд известных критериев. Однако даже при наличии чётко составленных инструкций определение приоритета может занимать значительное время [2]. Из этого следует, что указанный процесс имеет смысл пересмотреть и оптимизировать. В данной работе рассматриваются возможности использования для этих целей специально разработанных и настроенных автоматизированных систем, которые будут оценивать приоритет по заранее подобранным критериям, используя информационные технологии.

Наиболее простым вариантом будет добавление возможности указания приоритета при отправке. Если клиент при отправке обращения в специальном поле указал, что приоритет высокий, то именно в таком виде запрос далее и будет храниться в системе. Недостатком такого подхода является тот факт, что критерии, по которым пользователь будет определять приоритет, скорее всего будут слабо соотноситься с реальной приоритетностью обращения с точки зрения бизнеса. Это логично, ведь с точки зрения пользователя его обращение, как правило, имеет высокий приоритет.

Наиболее подходящим решением в этой ситуации будет создание автоматизированной системы такой, что будет определять приоритет на основании имеющихся данных запроса. К таким данным относится и информация, непосредственно отправленная самим клиентом, и автоматически определённые другими системами значения – например, категория запроса.

Простейшим вариантом реализации приоритезации является эвристический алгоритм, вычисляющий значение приоритета по некоторому набору подобранных правил. Например, все обращения, имеющие категорию «Инцидент», можно определять как высокоприоритетные и так далее. Главным преимуществом такого подхода является простота программной реализации. Главным недостатком – сложность выработки набора правил, который позволит системе определять приоритет с достаточной эффективностью [3].

Другим вариантом является определение приоритета на основании наличия в тексте обращения (тема и описание) ключевых слов из некоторого набора. К примеру, запросы, содержащие такие слова, как «срочно» или «экстренно», могут быть определены как высокоприоритетные. Данный подход может быть применён как отдельно, так и в совокупности с предыдущим. Простота реализации здесь также является главным преимуществом. Основным недостатком является потенциально низкая точность определения приоритета, так как высокоприоритетные запросы

вполне могут не содержать выбранных ключевых слов. Кроме того, сложностью является и формирование самого набора.

Ещё одним подходом к решению данной задачи может быть использование алгоритмов машинного обучения. В этом случае автоматизированное определение приоритета обращения может быть сведено к одной из двух общих задач [4]:

задача регрессии – предсказание численного значения приоритета на основании некоторого набора входных данных;

задача классификации – представление возможных вариантов приоритета в качестве некоторого набора классов и предсказание класса на основе входных данных.

В обоих случаях приоритезация запросов с помощью алгоритмов машинного обучения будет предполагать использование ряда классических подходов, описанных далее.

Как и во всех задачах машинного обучения, работа над реализацией системы предполагает проведение исследования существующих наборов данных и их соответствующей обработки.

Как правило, в рамках решения задач машинного обучения изначально требуется обработка и фильтрация данных, используемых для обучения. Это связано с тем, что данные обычно представлены в неподходящем виде, а некоторые записи могут быть некорректными и неподходящими для обучения [5].

Самым простым примером являются обращения, для которых по тем или иным причинам не указаны ни тема, ни описание. Необходимость обучения модели на таких записях лишено смысла. Другой пример – синтетические или тестовые обращения. Такие данные негативно скажутся на модели, так как они обычно сильно отличаются от записей, с которыми обученной модели будет необходимо работать.

Для проведения фильтрации обращений используются различные эвристические алгоритмы. С точки зрения реализации это проверка темы и описания на соответствие регулярному выражению и другие традиционные способы исследования содержимого текста [3].

К примеру, выражение «^Тест №[0-9]*$» позволяет исключить синтетические запросы, описание которых состоит из слова «Тест» и номера.

Следующим этапом обработки является проведение эвристических преобразований текста. Данные преобразования производятся как на обучающем наборе, так и для входных данных, с которыми система будет работать далее. В имеющихся строках необходимо вычленить семантически значимую информацию, исключив лишнее.

Наиболее простой частью преобразования является замена некоторых строк, соответствующих определённым регулярным выражениям, на ключевые слова. К примеру, наличие конкретных url-адресов может негативно сказаться на эффективности работы выбранной модели. В общем случае в каждом запросе они будут разными, однако важно сохранить сам факт наличия в тексте адреса, так как его наличие может быть важным при определении приоритета.

Более сложные преобразования включают в себя лемматизацию и замену некоторых именованных сущностей.

Лемматизация – представляет собой метод морфологического анализа. Он представляет собой приведение слова в некоторой форме к начальной форме, то есть лемме.

Лемматизация широко распространена в поисковых алгоритмах. Она является частью процесса схематизации веб-документов, который проводится при их индексировании.

При проведении лематизации у слова отбрасываются флективные окончания, что позволяет получить основную или словарную форму слова [6].

К примеру, в русском языке такой формой может быть:

для имён существительных – слово в именительном падеже единственном числе (при наличии);

для глаголов – слово в начальной или инфинитивной форме;

для прилагательных – слово в единственном числе, именительном падеже и мужском роде.

Замена именованных сущностей является ещё одним важным преобразованием. При обучении модели и интерпретации входных данных конкретные имена обычно не имеют значения, однако важным фактором может являться наличие в тексте имени как такового. Тем не менее, некоторые обозначения названий конкретных продуктов компании и т.п. всё же могут играть важную роль. Различные реализации этого подхода обычно не только находят именованные сущности, но и относят их к определённым категориям, что позволяет производить замену лишь тех имён, бесполезных при определении приоритета. Также можно составить список имён, имеющих большое значение для решения рассматриваемой задачи, и программно запретить убирать их из исходного запроса [7].

Для проведения лемматизации и поиска именованных сущностей могут быть использованы, к примеру, библиотеки Российского производства «Natasha». Данный проект предоставляет широкий спектр различных возможностей обработки русскоязычных текстов [8].

Библиотеки проекта позволяют решить многие базовые задачи обработки естественного русского языка. Среди них сегментация на токены и предложения, морфологический и синтаксический анализ, лемматизация, извлечение и интерпретация именованных сущностей и так далее [9].

Отличительная черта «Natasha» – высокая производительность и компактность моделей по сравнению, например, с библиотеками проекта «DeepPavlov». Кроме того, при работе модели используют возможности центрального процессора и не требуют наличия мощной графической карты [8].

Следующим этапом преобразования входных данных является представление текста в виде векторов, с которыми далее уже сможет работать выбранная модель. Такой подход называется word embedding [10]. Различные библиотеки предоставляют функционал для проведения такого преобразования. В качестве примера можно также привести проект «Natasha».

Одним из наиболее сложных вопросов данной темы является выбор и настройка подходящей модели. Для достижения наилучшего результата необходимо протестировать несколько моделей и сравнить их результаты.

В качестве примера модели можно привести настраиваемую сеть Sequential из библиотеки Keras. Keras – это библиотека с открытым исходным кодом, написанная на Python. Она обеспечивает взаимодействие с искусственными нейронными сетями и является надстройкой над популярным фреймворком машинного обучения TensorFlow [11].

Параллельно с указанными выше методами также может быть полезна реализация автоматического изменения приоритета с течением времени.

Для каждого обращения пользователя может быть определено некоторое значение, соответствующее моменту времени, к которому вопрос должен быть решен. Данное значение может определяться на основании даты отправки обращения и оценочного времени его решения (возможно, с некоторым запасом). Запросы, на решение которых осталось меньше времени, являются более высокоприоритетными.

Автоматизация процесса динамической приоритезации потребует реализации системы, производящей периодический анализ всех активных обращений и изменяющей приоритет в соответствии с количеством времени, оставшемся на их решение.

При оценке оставшегося времени могут быть применены 2 подхода:

оценка на основе абсолютного значения разницы между текущим моментом времени и моментом, к которому запрос по оценкам должен быть решен – то есть на основании абсолютного значения оставшегося на решение обращения времени;

оценка на основе отношения оставшегося на решение времени к общему времени, изначально выделенному на запрос.

Соответственно, более срочными будут являться запросы, на выполнение которых осталось меньше времени – либо относительно общего количества времени, выделенного на запрос, либо в абсолютном значении. Оба подхода могут быть эффективно применены в различных ситуациях.

Таким образом, процесс приоритезации пользовательских запросов в зависимости от бизнес-требований может быть частично или полностью автоматизирован. В этом могут помочь простые эвристические алгоритмы, но более эффективным вариантом будет использование технологий машинного обучения и в частности – обработки естественного языка. При использовании этих технологий крайне важна предварительная обработка данных: удаление лишних языковых конструкций, преобразование форм слов с помощью лемматизации, замена именованных сущностей и другие подходы. Приоритет может не только устанавливаться в момент получения обращения, но и меняться со временем в зависимости от внешних условий. Всё это позволит обрабатывать пользовательские обращения в таком порядке, какой будет наиболее полезен для предприятия.

Список литературы

1. Внедрение сервисдеска на предприятии [Электронный ресурс]. URL: https://mysmartservice.com/blog/vnedrenie-cervisdeska-na-predpriyatii (дата обращения: 01.05.2024).

2. Философия SLA: про приоритеты запросов [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/348550 (дата обращения: 03.05.2024).

3. Гудман С. Введение в разработку и анализ алгоритмов / С. Гудман, С. Хидетниеми ; пер. с англ. Ю. Б. Котова [и др.] ; под ред. В. В. Мартынюка. М.: Мир, 1981. 366 с.

4. Введение в машинное обучение [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/448892 (дата обращения: 05.05.2024).

5. Data mining : concepts and techniques / Jiawei Han, Micheline Kamber, Jian Pei // Morgan Kaufmann Publishers. 3rd ed. 2012.

6. An Interpretation of Lemmatization and Stemming in Natural Language Processing / Divya Khyani, Siddhartha B S, Niveditha N M, Divya B M BGS Institute of Technology, Adichunchanagiri University-BGSIT // Journal of University of Shanghai for Science and Technology. 2021.

7. Распознавание именованных сущностей: механизм, методики, сценарии использования и реализация [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/776774 (дата обращения: 10.05.2024).

8. Проект Natasha — набор Python-библиотек для обработки текстов на естественном русском языке [Электронный ресурс]. URL: https://natasha.github.io (дата обращения: 12.05.2024).

9. Проект Natasha. Набор качественных открытых инструментов для обработки естественного русского языка (NLP) [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/516098 (дата обращения: 13.05.2024).

10. Mohammad Taher Pilehvar and Jose Camacho-Collados. “Embeddings in Natural Language Processing: Theory and Advances in Vector Representations of Meaning‘‘. Morgan & Claypool (Synthesis Lectures on Human Language Technologies, edited by Graeme Hirst, volume 47), 2021, xvii+157 pp.

11. Developer guides [Электронный ресурс]. URL: https://keras.io/guides (дата обращения: 15.05.2024).

Лобзин Илья Александрович, аспирант, breadmaker888@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Научный руководитель: Арефьева Елена Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, ar_el_an@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF POSSIBILITIES TO AUTOMATE THE PROCESS OF PRIORITIZATION OF USER REQUESTS

I.A. Lobzin

This paper is devoted to exploring the potential for automating the prioritization of user requests. It considers various solutions to this issue, including heuristic approaches and various machine learning methods. Special attention is given to the latter in this study. The issues of data preparation, lemmatization, extraction of named entities and so on are also discussed in detail, and examples of existing solutions implementing these approaches are given.

Key words: automation, prioritization, Service Desk systems, user requests, natural language processing, NLP.

Lobzin Ilya Aleksandrovich, postgraduate, breadmaker888@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Research supervisor: Arefieva Elena Anatolievna, candidate of technical sciences, docent, ar_el_an@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.472
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-729-730

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩИХ РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ В СОЛНЕЧНОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКЕ

М.С. Дзитоев, Ю.В. Татаренко

В настоящей работе рассматривается применение в циклах солнечной газотурбинной установки рабочего вещества N_2O_4. Анализ термодинамических циклов СГТУ показал, что применение химически реагирующих рабочих веществ позволяет повысить их КПД и термодинамическую эффективность преобразования энергии солнечного излучения в электрическую (механическую). Наиболее эффективным для N_2O_4 является цикл СГТУ, в котором реализуется «замороженное» расширение рабочего вещества в турбине. В данном цикле снижается значение отношения давлений, но повышается КПД. В области параметров, характерных для СГТУ, возможно без уменьшения эффективности установки существенно снизить максимальную температуру цикла.

Ключевые слова: солнечная газотурбинная установка, азотный тетраоксид, переменный состав рабочего вещества, диссоциация, рекомбинация, эффективность, термический КПД.

Целесообразность использования химически реагирующего рабочего вещества в солнечной газотурбинной установке (СГТУ) с заданными характеристиками зависит от сложной совокупности различных параметров. Как известно, что при изменении параметров цикла для различных рабочих веществ изменяется и его эффективность. Таким образом, для любого цикла с заданными параметрами должны существовать оптимальные по своим свойствам рабочие вещества или для каждого рабочего вещества – оптимальные условия его применения в цикле СГТУ.

Начиная с середины XX-го столетия ученых интересовали свойства азотного тетраоксида. Наиболее актуальным это стало в эру развития ракетно-космической тематики. В начале 1950-х годов азотный тетраоксид был принят в качестве предпочтительного окислителя ракетного топлива, как в СССР, так и в США [1]. Хотя азотный тетраоксид N_2O_4 имеет некоторые недостатки, он не горюч, невзрывоопасен и обладает высокой коррозионной активностью [2-5].

Как указано в работе [6] «в космической технике для двигательных установок космических аппаратов, оснащенных топливными баками из титановых сплавов, в качестве окислителя применяют азотный тетраоксид, ингибированный закисью азота, которая препятствует образованию кислот, агрессивных к конструкционному материалу». Авторами предлагается методика расчета потерь азотного тетраоксида, ингибированного закисью азота, на паровую фазу.

В статье [7] указывается, что *несомненными преимуществами топливной пары АТ + НДМГ (азотный тетраоксид и гептил) являются высокие энергетические характеристики, возможность долгого хранения и самовоспламенение при контакте, что исключает необходимость использования системы зажигания.*

В источниках [8, 9] указывается, что повышение КПД циклов возможно за счет применения в энергетических установках в качестве рабочих веществ химически реагирующих газов.

Увеличение термодинамической эффективности цикла за счет применения азотного тетраоксида N_2O_4 объясняется тем, что диссоциация рабочего вещества в процессе подвода теплоты и рекомбинация в процессе отвода позволяют получить рабочее вещество с высоким значением газовой постоянной в процессе расширения на турбине по сравнению с газовой постоянной рабочего вещества в процессе сжатия в компрессоре [10]. Предложенный подход к анализу циклов с рабочим веществом переменного состава не совсем удачен, так как разницей значений газовых постоянных в процессах сжатия в компрессоре и расширения на турбине можно объяснить увеличение работы цикла при прочих равных условиях.

Критерием эффективности служит термический КПД, определяющий термодинамическую эффективность цикла, так и СГТУ в целом.

Применение химически реагирующих рабочих веществ позволит снизить температуру рабочего вещества перед турбиной.

Рассмотрим цикл СГТУ, представленный на рис.1, где в качестве рабочего вещества используется азотный тетраоксид N_2O_4, обладающий такими физико-химическими свойствами, как диссоциация в две стадии.

При численном исследовании введем следующие допущения:

– состав рабочего вещества может изменяться во всех процессах цикла;

– изменение состава рабочего вещества обратимы;

– все процессы, участвующие в цикле (исключение: процессы сжатия и расширения) обратимы. Необратимость процессов сжатия и расширения учитывается только отличием от единицы КПД компрессора и турбины.

Для определения основных характеристик цикла СГТУ составим систему уравнений (1), описывающую рассматриваемый цикл с учетом принятых допущений.

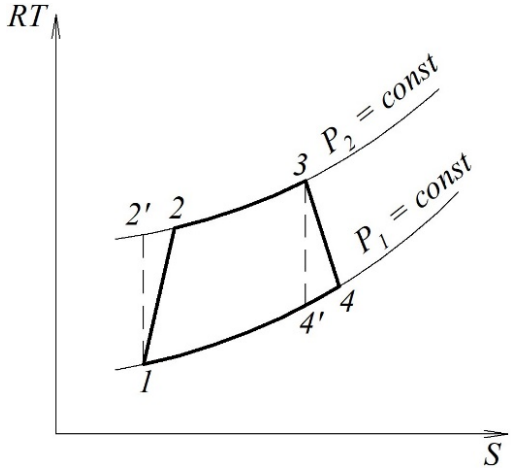


Рис. 1. Цикл СГТУ с химически реагирующим рабочим веществом: 1-2'-3-4' – идеальный цикл, 1-2-3-4 – реальный цикл

$$\left.\begin{aligned} & p_1 = p_4 \\ & p_3 = p_2 \\ & s_1(p_1,T_1) = s_2(p_2,T_2) \\ & s_3(p_3,T_3) = s_4(p_4,T_4) \\ & i_2(p_2,T_2) = i_2\left(p_2,T_2^{\text{ид}}\right)\frac{1}{\eta_\text{к}} - i_1(p_1,T_1)\left(\frac{1}{\eta_\text{к}}-1\right) \\ & i_4(p_4,T_4) = i_4\left(p_4,T_4^{\text{ид}}\right)\eta_\text{т} + i_3(p_3,T_3)(1-\eta_\text{т}) \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Введем дополнительные определяющие соотношения в уравнение (1):

$$s(p,T) = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} S_i(p_i,T_i)}{p},$$

$$i(p,T) = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} I_i\ p_i}{\sum\limits_{i=1}^{n} p_i\ \mu_i}, \quad (2)$$

где s – энтропия моля рабочего вещества; i – энтальпия 1 кг массы рабочего вещества; S_i, I_i – полная энтропия и энтальпия одного моля i-го компонента рабочего вещества переменного состава; p_i, μ_i – парциальное давление и молекулярная масса i-го компонента рабочего вещества переменного состава.

Состав рабочего вещества при заданных параметрах p и T определяется следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} & K_{p_1}(T) = \frac{p_{\text{NO}_2}^2}{p_{\text{N}_2\text{O}_4}} \\ & K_{p_2}(T) = \frac{p_{\text{NO}}^2 p_{\text{O}_2}}{p_{\text{NO}_2}} \\ & P = \sum_{i=1}^{4} p_i \\ & p_{\text{NO}} = 2p_{\text{O}_2} \end{aligned}\right\}, \quad (3)$$

где K_{p_1} и K_{p_2} – константы равновесия.

Термический КПД и работа определяется в соответствии с первым законом термодинамики:

$$\left.\begin{aligned} & \eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \\ & l_\text{ц} = q_1 - q_2 = \eta_t\ q_1 \end{aligned}\right\}, \quad (4)$$

где Q_1, Q_2 – абсолютные значения подведенного и отведенного тепла в цикле;

$$q_1 = \frac{Q_1}{m}; \qquad q_2 = \frac{Q_2}{m};$$

m – масса рабочего вещества.

Для основных характеристик цикла СГТУ с рабочим веществом переменного состава после преобразований получим следующие выражения:

$$\left.\begin{aligned}\eta_t &= 1-\frac{\frac{n_3T_3}{n_1T_1}\left[1-\eta_т\left(1-\frac{1}{\pi^{\beta}}\right)\right]-1}{\frac{n_3T_3}{n_1T_1}-\left(1+\frac{\pi^{\alpha}-1}{\eta_к}\right)}\cdot\frac{c_{pmx}}{c_{pmг}}\\ l_ц &= \frac{c_{pmг}T_3}{\mu_3}\left\{1-\frac{n_1T_1}{n_3T_3}\left(1+\frac{\pi^{\alpha}-1}{\pi_к}\right)-\frac{c_{pmx}}{c_{pmг}}\left[1-\eta_т\left(1-\frac{1}{\pi^{\beta}}\right)-\frac{n_1T_1}{n_3T_3}\right]\right\}\end{aligned}\right\}, \quad (5)$$

где $c_{pmг}$ – средняя мольная изобарная теплоемкость в процессе подвода тепла; c_{pmx} – средняя мольная изобарная теплоемкость в процессе отвода тепла; $\pi^{\alpha}=\frac{n_2T_2}{n_1T_1}$ – отношение давлений в процессе сжатия; $\alpha=\frac{R}{c_{pm\,сж}}$ – показатель процесса сжатия; $c_{pm\,сж}$ – средняя изобарная теплоемкость одного моля рабочего вещества в процессе сжатия; $\beta=\frac{R}{c_{pm\,расш}}$ – показатель процесса расширения; $c_{pm\,расш}$ – средняя изобарная теплоемкость одного моля рабочего вещества в процессе адиабатного расширения; μ_3 – молекулярный вес рабочего вещества перед турбиной.

Анализируя уравнения (5) и предположив, что n = const уравнения будут соответствовать выражениям для классического цикла Брайтона. Таким образом, основные характеристики цикла СГТУ с химически реагирующим рабочим веществом определяются не только степенью повышения давления π, но и температурным диапазоном $\frac{T_3}{T_1}$, в котором осуществляется цикл, степенью изменения числа молей $\frac{n_3}{n_1}$, а также средними мольными теплоемкостями рабочего вещества во всех процессах, образующих цикл. Численные значения последних определяются не только изменением числа молей рабочего вещества, но и энергией (тепловым эффектом) химической реакции, проходящей в соответствующем процессе.

Хотя основные характеристики цикла, определяемые согласно системы уравнений (5) не зависят явно от распределения изменения числа молей по отдельным процессам, образующим цикл, ввиду того, что в уравнения входит только изменение числа молей в цикле $n_3/\ n_1$, можно отметить, что это распределение оказывает существенное влияние на характеристики цикла.

Предположим, что в каком-либо из процессов сжатия 1-2 или подвода теплоты 2-3 в рабочем веществе реализуются эндотермические реакции с увеличением числа молей, в частности – реакции диссоциации.

Таким образом, можно предположить, что возможно осуществить два варианта реализации данной реакции. В первом случае, если диссоциация происходит только в процессе подвода теплоты, а в процессе сжатия состав рабочего вещества не изменяется, то показатель процесса сжатия α будет иметь максимальное значение и определяться, как:

$$\alpha=\frac{R}{c_{pm\,сж}}=\frac{k}{k-1},$$

где k – показатель адиабаты Пуассона для рабочего вещества соответствующего состава.

Во втором варианте, если диссоциация имеет место только в процессе сжатия, а в процессе подвода теплоты состав рабочего вещества не изменяется, то показатель процесса сжатия α будет иметь минимальное значение, в связи с тем, что $c_{pm\,сж}$ достигнет максимального, для заданного изменения числа молей в цикле и энергии диссоциации величины.

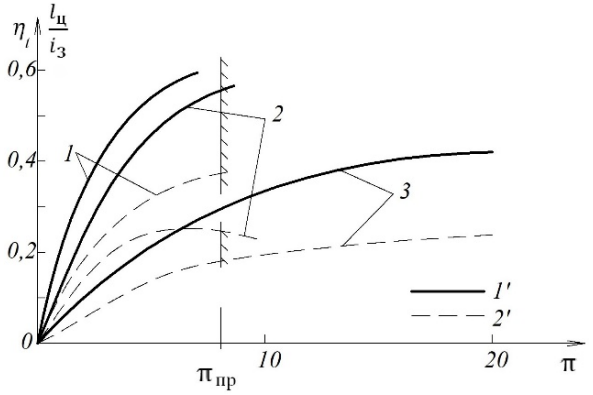


Рис. 2. Зависимость основных характеристик цикла СГТУ: с химически реагирующим рабочим веществом от степени сжатия: 1 – α = 0,2, β = 0,4 – диссоциация осуществляется в процессах сжатия и подвода теплоты; расширение на турбине – «замороженное»; 2 – α = 0,286, β = 0,4 – диссоциация осуществляется только в процессе подвода теплоты; сжатие в компрессоре и расширение на турбине – «замороженное»; 3 – α = 0,15, β = 0,2 – диссоциация осуществляется в процессах сжатия и подвода теплоты; рекомбинация – в процессах расширения на турбине и отвода теплоты; 1′ – термический КПД цикла; 2′ – относительная

работа цикла (отношение работы цикла к энтальпии рабочего вещества перед турбиной)

Все отмеченное в отношении показателя процесса сжатия α, качественно справедливо и для показателя расширения β, но применительно к рекомбинации рабочего вещества в процессах адиабатного расширения на турбине и изобарного отвода теплоты.

Таким образом резюмируя можно сказать, что основные характеристики цикла СГТУ в значительной степени определяются численными значениями α и β, и особенно их соотношением.

При проведении численного исследования было принято, что $p_1 = 10^5$ Па, $T_1 = 315$ К, $\eta_к = \eta_т = 0{,}9$.

На рис. 2 представлены зависимости η_t и $\frac{l_ц}{i_3}$ от степени сжатия в компрессоре π для рабочего вещества в недиссоциированном состоянии, представляющее собой произвольный двухатомный газ.

На входе в компрессор газ недиссоциирован. Перед турбиной рабочее вещество считалось практически полностью диссоциированным. Температурный диапазон, в котором осуществляется цикл, специально выбран небольшим, так как чем меньше $\frac{T_3}{T_1}$, тем в более значительной степени проявляются преимущества применения химически реагирующих рабочих веществ.

Анализ этих зависимостей показал, что при малых степенях сжатия ($\pi \prec 10$) наиболее эффективными являются циклы, в которых реализуется диссоциация рабочего вещества в процессе сжатия и подвода теплоты, а рекомбинация – в процессе отвода теплоты; расширение на турбине – «замороженное». Причем, чем в большей степени реализуется диссоциация в процессе сжатия, тем более эффективен цикл.

Максимальные степени сжатия, при которых могут быть реализованы рассматриваемые циклы, ограничены не только и не столько возможностью подвода теплоты к рабочему веществу, что характерно и для классического цикла Брайтона, но главным образом – возможностью отвода теплоты в цикле. Цикл СГТУ не реализуем не только при $T_3 \prec T_2$, но и при $T_4 \prec T_1$.

Считая, что предельная степень повышения давления в компрессоре определяется из условия $T_4 = T_1$, предельное значение степени сжатия можно определить по следующему выражению:

$$\pi_{пред} = \left(\frac{1}{1 - \frac{1 - \frac{T_1}{T_3}\frac{n_4}{n_3}}{\eta_т}} \right)^{1/\beta}$$

Цикл СГТУ, в котором диссоциация осуществляется в процессах сжатия и подвода теплоты, а рекомбинация – в процессах расширения на турбине и отвода теплоты, при малых степенях сжатия имеет меньшую эффективность по сравнению с ранее рассмотренными. Однако с увеличением степени сжатия эффективность последнего цикла непрерывно возрастает по сравнению с другими.

При выбранных параметрах численного исследования цикла СГТУ $\frac{T_3}{T_1} = 2$, $\frac{n_3}{n_1} = 2$ и КПД турбины и компрессора $\eta_к = \eta_т = 0{,}9$, а также характеристиках рабочего вещества $\alpha = 0{,}15$, $\beta = 0{,}2$ предельное значение степени сжатия будет $\pi_{пред} \succ 56$. При $\pi = 50$ основные характеристики цикла будут соответственно равны $\eta_t \cong 0{,}53$ и $\frac{l_ц}{i_3} \cong 0{,}27$.

Таким образом, за счет рационального изменения состава рабочего вещества можно реализовать высокую эффективность цикла СГТУ при любых степенях сжатия. Однако, оптимальные изменения состава рабочего вещества зависят от величины степени сжатия.

При малых степенях сжатия (в рассматриваемых случаях $\pi \prec 10$) наибольшая эффективность достигается в случае реализации диссоциации в процессах сжатия и подвода теплоты и «замороженном» расширении на турбине; рекомбинация рабочего вещества осуществляется в процессе отвода теплоты.

Чем меньше степень рекомбинации на турбине и больше степень диссоциации в компрессоре, тем меньше степень сжатия, при которой достигается высокая эффективность цикла с химически реагирующем рабочим веществом.

Поэтому, при малых степенях сжатия наиболее целесообразными являются циклы, в которых состав рабочего вещества в процессе расширения на турбине не изменяется.

На рис. 3 представлены основные характеристики цикла с химически реагирующем рабочим веществом и эквивалентного классического цикла Брайтона. Из анализа представленных характеристик следует, что преимущество цикла с переменным составом рабочего вещества является подавляющим, и тем в большей степени, чем больше степень сжатия, реализуемая в цикле с переменным составом рабочего вещества.

Если же классический цикл Брайтона сравнить с циклами, представленными на рис. 2, то преимущество циклов СГТУ с рабочим веществом переменного состава окажется еще более существенным.

Преимущества циклов СГТУ с химически реагирующим рабочим веществом определяются следующим: при ограничениях по температуре рабочего вещества перед турбиной соответствующее изменение состава рабочего вещества за счет химических реакций позволяет при заданном количестве подводимой в цикле теплоты увеличить степень сжатия в компрессоре и повысить работоспособность рабочего вещества перед турбиной и не только за счет

повышения степени сжатия, но и за счет увеличения числа молей рабочего вещества. Именно поэтому диссоциация рабочего вещества, и особенно в процессе сжатия, оказывает существенное влияние на повышение эффективности циклов СГТУ.

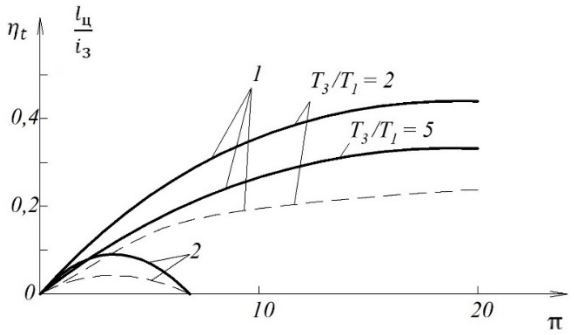


Рис. 3. Основные характеристики циклов СГТУ химически реагирующим рабочим веществом (диссоциирующий двухатомный газ) и рабочим веществом постоянного состава (недиссоциирующий двухатомный газ): 1 – α = 0,15, β = 0,2 – диссоциация осуществляется в процессах сжатия и подвода теплоты; рекомбинация – в процессах расширения на турбине и отвода теплоты; 2 – α = β = 0,286 – рабочее вещество постоянного состава

Из сравнения зависимостей, представленных на рис.3, видно, что с увеличением $\frac{T_3}{T_1}$ преимущество применения химически реагирующих рабочих веществ уменьшается. В предельном случае, который относится к варианту, когда отсутствует ограничение перед турбиной, применение рабочего вещества постоянного состава не дает принципиального преимущества по сравнению с циклом Брайтона. Таким образом, чем в большей степени ограничена температура рабочего вещества перед турбиной, тем более эффективно применение в СГТУ рабочего вещества переменного состава.

Основные выводы по работе:

1. На основе фундаментальных законов термодинамики систем переменного состава, разработан термодинамический метод анализа циклов СГТУ с химически реагирующим рабочим веществом.

В результате термодинамического исследования установлено, что эффективность циклов СГТУ с химически реагирующем рабочим веществом существенно выше классического цикла Брайтона в широком диапазоне степеней сжатияи тем больше, чем ниже допустимая температура рабочего вещества перед турбиной.

2. Изменение состава рабочего вещества, соответствующее максимальной эффективности цикла, зависит от степени сжатия в компрессоре. При значениях степени сжатия, характерных для современных СГТУ, наиболее эффективным является цикл, в котором реализуется диссоциация рабочего вещества в процессах сжатия и подвода тепла с «замороженным» расширением на турбине.

Список литературы

1. Fire, Explosion, Compatibility, and Safety Hazards of Nitrogen Tetroxide // American Institute of Aeronautics and Astronautics Special Project Report. AIAA SP-086-2001. 2001**.**

2. STAI D.F., Bizjak F. and Stephanou S. E. Thermodynamic properties of nitrogen tetroxide // ARC. Vol. 2. No.5, 1965. P.742.

3. Brice D.B. , Fishman N. Some Physical Properties for the System Nitrogen Tetroxide-Nitric Oxide // ARC. Vol. 29. No.5, 1959. P.354.

4. Sasahira A., Kawamura F. Formation Rate of Ruthenium Tetroxide during Nitric Acid Distillation // Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 25. No 7, 1988. PP. 603-606.

5. Нестеренко В.Б., Бубнов В.П., Котелевский Ю.Г. и др. Физико-химические и теплофизические свойства химически реагирующей системы // Мн.: Наука и техника, 1976. С.93, 325.

6. Ведерников М.В., Казимиров А.В., Малков И.В., Фроленок М.А., Осецкий С.И., Апевалов И.В. Методика расчета потерь азотного тетраоксида, ингибированного закисью азота, на паровую фазу // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. №636. 2012. С. 10-15.

7. Самарский университет: официальный сайт. Самара, 2024. [Электронный ресурс] URL: https://ssau.ru/news/23156-samarskie-uchenye-i-studenty-razrabotali-model-ekologichnogo-dvigatelya-dlya-sverkhlegkikh-raket-nositeley (дата обращения: 10.05.2024).

8. Бажин М.А, Нестеренко В.Б. Анализ газовых циклов на диссоциирующих рабочих телах // Известия АН БССР, серия физико-энергетических наук. 1972. №3-4.

9. Суровцев И.Г. Термодинамическая эффективность применения N_2O_4 в установках, работающих по газовому циклу // Известия АН БССР, серия физико-энергетических наук. 1972. №4.

10. Физико-химические и теплофизические свойства растворов на основе четырехокиси азота / под ред. В.Б. Нестеренко. Мн.: Наука и техника, 1981. 220 с.

Дзитоев Марат Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, lavrtat@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Татаренко Юлия Валентиновна, канд. техн. наук, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

RATIONALE FOR THE APPLICATION OF CHEMICALLY REACTING WORKING SUBSTANCES IN A SOLAR GAS TURBINE PLANT

M.S. Dzitoev, Y.V. Tatarenko

This work examines the use of N_2O_4 as a working substance in the cycles of a solar gas turbine plant. An analysis of the thermodynamic cycles of SGTP showed that the use of chemically reacting working substances makes it possible to increase their efficiency and thermodynamic efficiency of converting solar radiation energy into electrical (mechanical) energy. The most effective for N_2O_4 is the SGTP cycle, in which the "frozen" expansion of the working substance in the turbine is realized. In this cycle, the pressure ratio decreases and efficiency increases. In the range of parameters characteristic of SGTP, it is possible to significantly reduce the maximum cycle temperature without reducing the efficiency of the installation.

Key words: solar gas turbine plant, nitrogen tetroxide, variable composition of the working substance, dissociation, recombination, efficiency, thermal efficiency.

Dzitoev Marat Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, lavrtat@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Tatarenko Yulia Valentinovna, candidate of technical sciences, docent, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky

УДК 621.7.06
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-734-735

РЕДУКТОР ДЛЯ ГАЛТОВОЧНОЙ МАШИНЫ

Е.И. Яцун, И.Е. Дергачев

Рассмотрены возможности повышения производительности процесса магнитной галтовки увеличением ее интенсивности путем создания сложных траекторий движения магнитов по гипотрохоидам на основе применения в устройстве магнитной галтовки специального редуктора.

Ключевые слова: магнитная галтовка, интенсивность процесса, магнитное поле, гипотрохоида, редуктор.

Галтовка представляет собой обкатку деталей в специальных барабанах совместно с абразивными и полирующими материалами.

Принцип действия галтовочной обработки основан на движении наполнителя в виде иголок за счёт магнитного поля. Магнитное поле создаётся за счёт перемещающихся постоянных магнитов. Иголки перемещаются с определённым ускорением, осуществляя взаимодействие с помещенными в ёмкость изделиями, при этом последние подвергаются многочисленным микроударам со стороны наполнителя. За счёт взаимодействия происходит обработка поверхности изделий во всех труднодоступных местах, а также частичное упрочнение поверхности изделий.

При воздействии магнитного поля в рабочем зазоре магнитный наполнитель ориентируются своей большей осью вдоль магнитных силовых линий, уплотняются и прижимаются острыми гранями к обрабатываемой поверхности. В результате этого обработка поверхности детали производится острыми кромками, т. е. имеет место процесс ориентированного абразивного резания [1-5].

Исследование существующих конструкций магнитных абразивных устройств, а также вариантов расположения магнитов привело к следующим выводам [6-12]:

– применение различных вариантов установки магнитов позволяет получать магнитные поля с различной интенсивностью в разных точках рабочего объема;

– все известные на сегодняшний момент конструкции магнитных галтовочных машин предполагают движение магнитов по простой траектории – окружности, независимо от расположения магнитов;

– интенсивность смены траекторий движения иголок наполнителя после установившегося режима снижается, что при обработке деталей сложного профиля может привести к ограниченной обработке некоторых зон детали;

– для повышения производительности необходимо увеличить интенсивности магнитной галтовки созданием сложных траекторий движения магнитов по гипотрохоидам;

– для создания траекторий движения магнитов по гипотрохоидам предлагается применить в устройстве магнитной галтовки специальный редуктор.

В качестве прототипа выбрана конструкция магнитной галтовочной машины (рис. 1) [13]. Машина может быть использована для суперфинишной обработки резанием – шлифования, полирования, очищения и обезжиривания поверхностей. Для создания траекторий движения магнитов по сложным траекториям – гипотрохоидам в устройстве магнитной галтовки применяется специальный планетарный редуктор (рис. 2). Это техническое решение позволяет интенсифицировать турбулентное перемещение магнито-абразивных частиц и обеспечить их разнонаправленное движение по всей зоне обработки.

Основные части планетарной передачи показаны на рис. 3.

Вращение от главной передачи 4 передаётся через полуоси на солнечную шестерню 1. Солнечная шестерня вращает сателлиты 2, они вращаются на своих осях, которые закреплены на водиле 3. Сателлиты, вращаясь, передают

движение коронной шестерне, а она – к ступице. В планетарных передачах применяются не только цилиндрические, но и конические колеса. Зубья могут быть прямые и косые.

Планетарный редуктор используется для передачи и преобразования крутящего момента. Основной задачей планетарных передач является увеличение крутящего момента. Крутящий момент увеличивается во столько раз, во сколько раз количество зубьев на солнечной шестерне меньше количества зубьев коронного колеса.

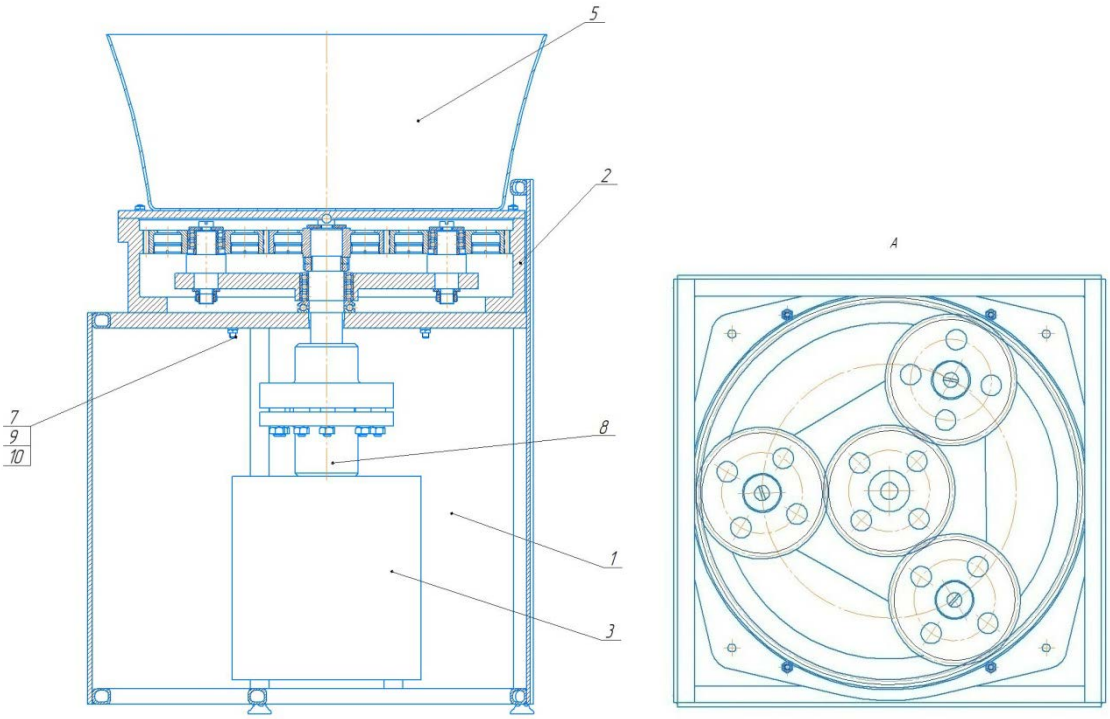


Рис. 1. Чертеж прототипа магнитной галтовочной машины

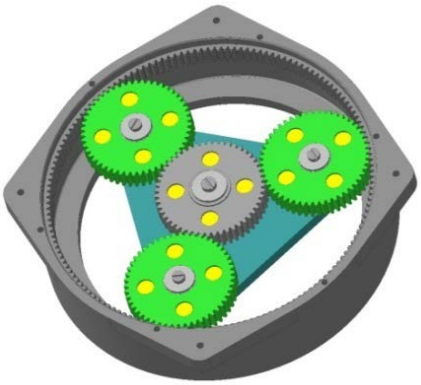


Рис. 2. 3D-модель планетарной передачи

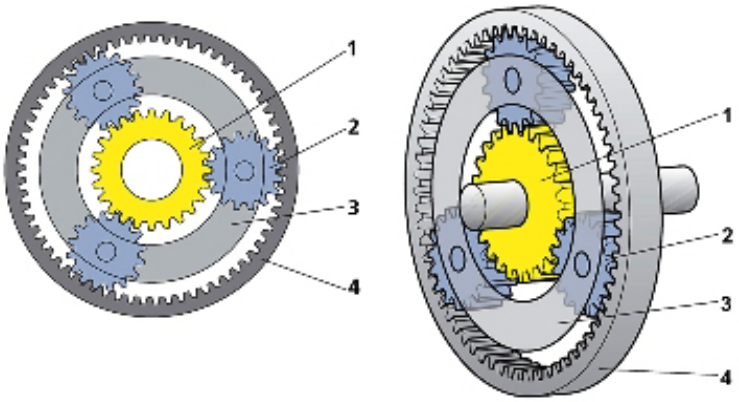
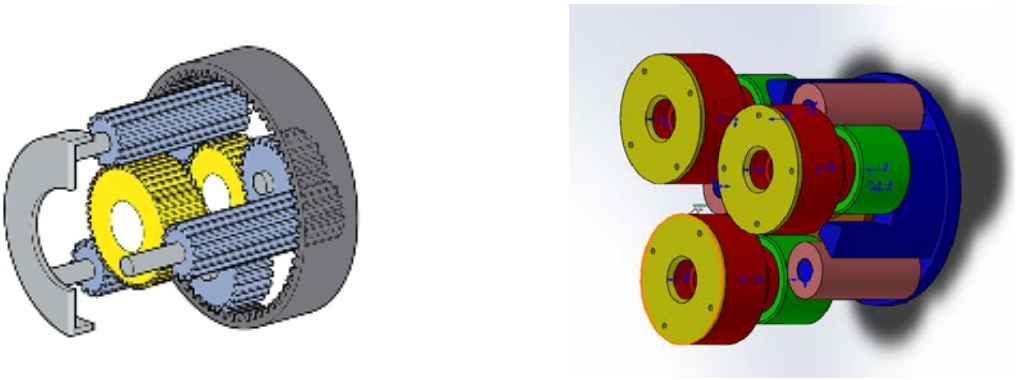


Рис. 3. Устройство планетарной передачи: 1 – солнечная шестерня; 2 – сателлиты; 3 – водило; 4 – коронная шестерня (эпицикл)

Для увеличения производительности галтовочной машины за счет повышения интенсивности магнитных полей в разных точках рабочего объема разработана новая конструкция планетарного редуктора.



а ***б***

Рис. 4. 3D-модели планетарных редукторов: а – редуктора Равиньо; б – редуктора галтовочной машины

На основе данной конструкции разработана кинематическая схема галтовочной машины с новым редуктором (рис. 5).

От электродвигателя 1 вращение передается на корпус редуктора 3, который вращается вместе с валом электродвигателя. Три сателлита – зубчатые колеса 5 вращаются вместе с корпусом 3 и приводят во вращение колеса 6. На колесах 6 установлены пластиковые втулки 7 с магнитами 8. На каждой втулке установлено по четыре постоянных неодимовых магнита Nd2Fe14B. Зубчатое колесо 4 не вращается и соединено с чашей 9. Вся конструкция установлена в корпусе 10.

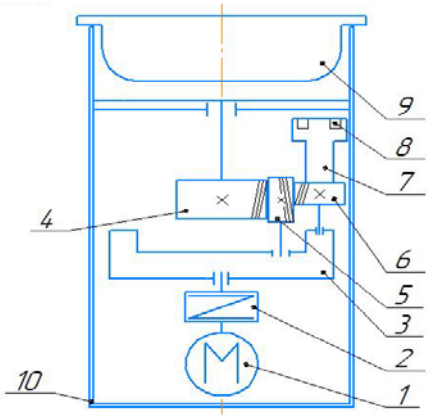


Рис. 5. Кинематическая схема галтовочной машины: 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – корпус редуктора; 4 – солнечное колесо; 5 – шестерня; 6 – зубчатое колесо; 7 – держатель магнитов; 8 – магниты; 9 – барабан; 10 – корпус

Машина работает следующим образом. В чашу с наполнителем, соединенную с планетарным редуктором, помещают обрабатываемые изделия. Используются наполнители стальные для электромагнитной галтовки («иголки»).

Наполнители представляют собой стальные цилиндры диаметром 0,3-0,5 мм и длиной 4-7 мм. Материал иголок является ферромагнетиком, а их протяженная форма заставляет их поворачиваться по магнитным линиям.

При работе машины наиболее сильные магнитные поля будут возникать между разноименными полюсами магнитов.

Применение различных вариантов установки магнитов позволяет получать магнитные поля с различной интенсивностью в разных точках рабочего объема.

Для изменения характера и траекторий движения иголок наполнителя предлагается вместо простого вращения магнитов вокруг оси применить в устройстве магнитной галтовки планетарную передачу для организации движения магнитов по сложным траекториям – гипотрохоидам.

Гипотрохоида – плоская кривая, образуемая фиксированной точкой, находящейся на фиксированной радиальной прямой окружности, катящейся по внутренней стороне другой окружности (рис. 6).

Формула гипотрохоиды в декартовых координатах:

$$\begin{cases} x = (R-r)\cos\phi + h\cdot\cos(\dfrac{R-r}{r}\cdot\phi) \\ y = (R-r)\sin\phi + h\cdot\sin(\dfrac{R-r}{r}\cdot\phi) \end{cases},$$

где R – радиус внешней окружности; r – радиус внутренней окружности; h – высота расположения точки от центра внутренней поверхности; φ – параметрический угол кривой.

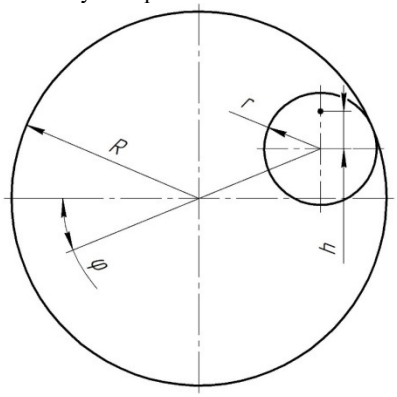


Рис. 6. Схема расчета параметров гипотрохоиды

Варианты расположения магнитов на элементах планетарной передачи показаны на рис. 7.

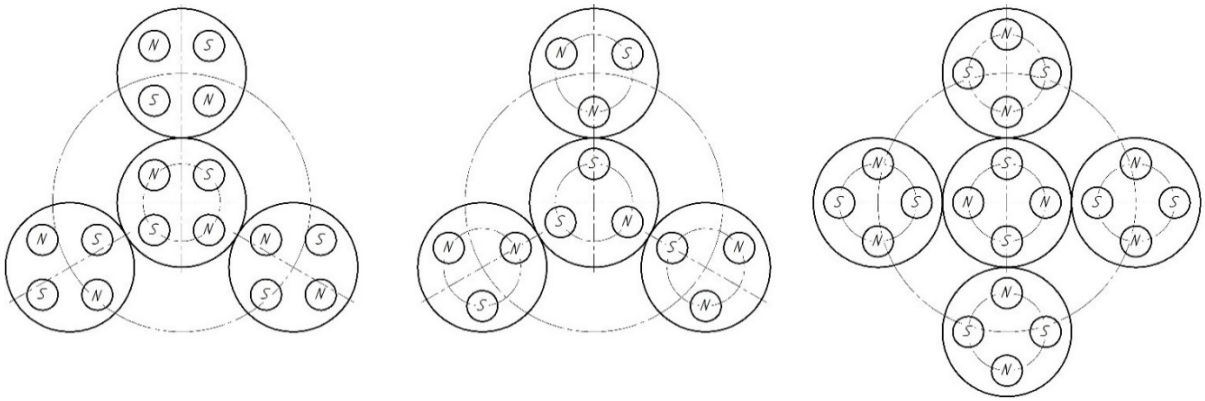
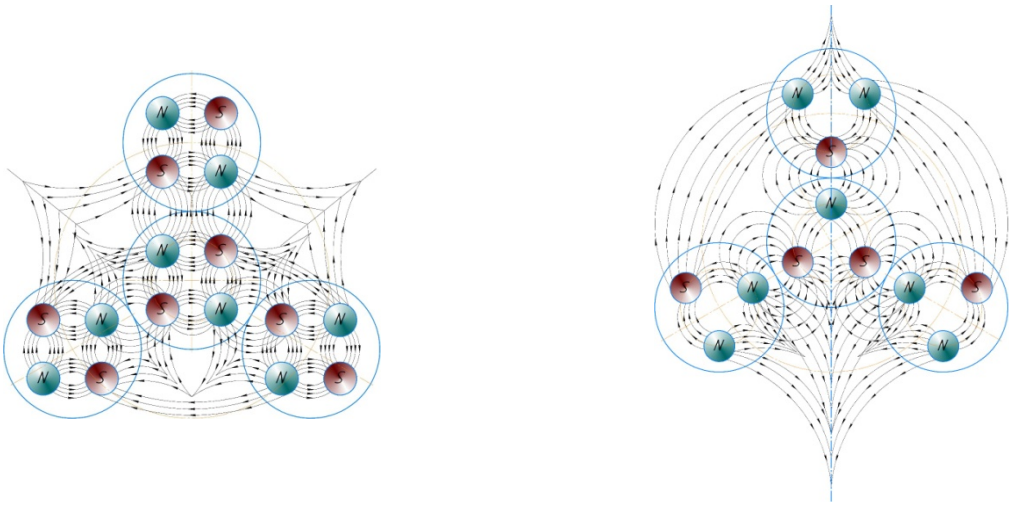


Рис. 7. Варианты расположения магнитов на элементах планетарной передачи

Используются редкоземельные магниты с параметрами: диаметр магнита 20 мм; толщина – 10 мм. Неодимовый магнит 20х10 обладает большой магнитной силой за счет применения в нем редкоземельных металлов *Nd* (неодим – относится к группе лантаноидов).

В проектной части рассмотрены варианты установки магнитов для планетарной передачи с тремя сателлитами и возможностью установки от 12 до 16 неодимовых магнитов (рис. 7). От расположения постоянных магнитов в рабочей области магнитной галтовки зависит сила резания и траектория движения игл в рабочем контейнере. В установке необходимо использовать постоянные магниты с высокой коэрцитивной силой и располагать их таким образом, чтобы разноименные полюса были направлены друг против друга и достигалась высокая общая неоднородность магнитного поля (рис. 8).



а ***б***

Рис. 8. Интенсивность магнитных полей в разных точках рабочего объема: а – 16 магнитов; б – 12 магнитов

Выполнен расчет привода; мощности привода; диаметров валов; модулей колес; уточненный расчет валов; планетарного редуктора.

Мощность привода:

$$N_{эд} = \frac{N_э}{\eta} + N_{хх},$$

где $N_э$ – эффективная мощность, необходимая для выполнения полезной работы; η – КПД цепи; $N_{хх}$ – мощность холостого хода привода.

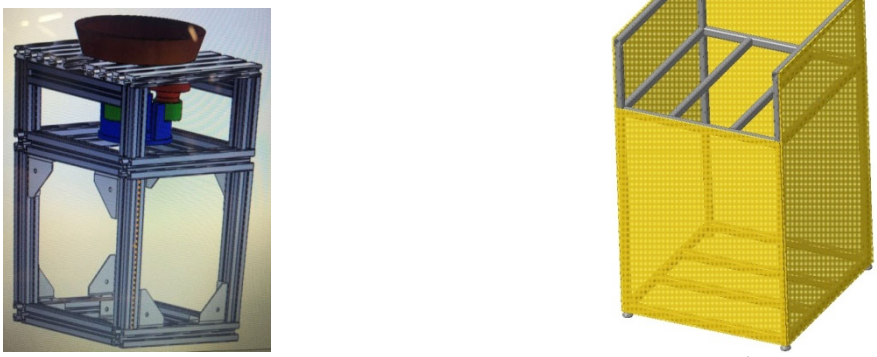
Мощность холостого хода:

$$N_{хх} = k_M \cdot d_{ср} \cdot 10^{-5} \cdot (n_1 + n_2 +_{...} + n_i),$$

где k_M – коэффициент, характеризующий конструкцию элементов привода и качество его изготовления k_M =3…6. Чем проще конструкция и лучше условия смазки, тем меньше коэффициент k_M ; $n_1, n_2, _{...}, n_i$ – числа оборотов промежуточных валов привода; $d_{ср}$ – средний диаметр всех промежуточных валов привода, см.

Мощность привода принята $N_э$ =2 кВт, выбран шлицевый вал 6х23х26 мм, модуль шестерни составил $m = 1{,}5$ мм. Тогда $N_{хх}$ =0,32 кВт.

Создана 3D-модель машины (рис. 9).



а ***б***

Рис. 9. Конструкция галтовочной машины: а – 3D-модель машины; б – 3D-модель корпуса

Проведен выбор комплектующих изделий: стандартный алюминиевый конструкционный профиль 30х30 мм для изготовления несущей части и соединительная фурнитура; электродвигатель; магниты – 12 шт.

Разработаны рабочие чертежи и 3D-модели деталей. Зубчатые колеса и втулки под магниты: материал – пластик Nylon (PA) изготовлены на 3D-принтере; валы – сталь 45. Остальные детали редуктора изготовлены на станке с ЧПУ (рис. 10).



а ***б***

Рис. 10. Изготовление редуктора: а – шестерни из пластика; б – изготовление на станке с ЧПУ

Суммарная мощность магнитного поля по варианту 16 магнитов – до 1440 Дж; 12 магнитов – до 1080 Дж.

Работа выполнена в рамках программы Стартап «Машина для магнитной галтовки».

Список литературы

1. Полетаев В.А., Чернов Л.К. Исследование взаимодействия частиц в магнитном поле рабочего пространства магнитно-абразивного устройства // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2012. № 3. С. 31-35.

2. Барон Ю.М. Магнито-абразивная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение, 1986. 176 с.

3. Барон Ю.М. Технология абразивной обработки в магнитном поле. Л.: Машиностроение, 1975. 128 с.

4. Автоматическая загрузка прессов штучными заготовками / В.Ф. Прейс, И.С. Бляхеров, В.В. Прейс, Н.А. Усенко. М.: Машиностроение, 1975. 280 с.

5. Давыдова Е.В., Прейс В.Ф. Автоматическая загрузка стержневых предметов обработки с неявно выраженной асимметрией по торцам. Тула: Изд-во Тульского государственного университета. 2009. 112 с.

6. Яцун Е.И., Железняков Д.А., Дергачев И.Е. Машина для магнитной галтовки // Сб. науч. тр. 8-й Междунар. молодежн. научн. конф. «Юность и знания – гарантия успеха». Курск: Изд-во: Юго-Западного государственного университета. 2021. С. 350-357.

7. Патент 97076 РФ. Устройство для магнитно-абразивной галтовки / В.А. Полетаев, Н.Л. Павлюкова, Л.К. Чернов. Опубл. 27.08.2010. Бюл. № 24.

8. Патент 115279 РФ. Устройство для магнитно-абразивной галтовки / В.А. Полетаев, Л.К. Чернов. Опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.

9. Патент 115705 РФ. Устройство для магнитной галтовки / В.А. Полетаев, Л.К. Чернов. Опубл. 27.11.2013. Бюл. № 33.

10. Патент 111795 РФ. Устройство для магнитно-абразивной галтовки / В.А. Полетаев, Л.К. Чернов. Опубл. 27.12.2011. Бюл. № 36.

11. Патент 125918 РФ. Устройство для магнитной галтовки / В.А. Полетаев., Л.К. Чернов. Опубл. 20.03.2013. Бюл. № 8.

12. Патент 2460584 РФ. Магнитный сепаратор / В.В. Кармазин, В.Г. Андреев, С.И. Кретов, Ю.М. Пожарский, Н.П. Кармазина. Опубл. 10.09.2012. Бюл. № 25.

13. Патент 206543 РФ. Магнитная галтовочная машина / Е.И. Яцун, В.В. Пономарев, Д.А. Железняков. Опубл. 15.09.2021. Бюл. № 26.

Яцун Елена Ивановна, канд. техн. наук, доцент, el.yatsun@gmail.com, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Дергачев Игорь Евгеньевич, студент, mtio29@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет

GEARBOX FOR A ROLLING MACHINE

E.I. Yatsun, I.E. Dergachev

The possibilities of increasing the productivity of the magnetic tipping process by increasing its intensity by creating complex trajectories of the movement of magnets along hypotrochoids using a special reducer in the magnetic tipping device are considered.

Key words: magnetic bending, process intensity, magnetic field, hypotrochoid, reducer.

Yatsun Elena Ivanovna, candidate of technical sciences, docent, el.yatsun@gmail.com, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Dergachev Igor Evgenievich, student, mtio29@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University

УДК 629.114.2:634.0.38
DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-739-740

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТЯГОВЫХ КАЧЕСТВ ТРАКТОРА ЛХТ-55

С.Ш. Саая, С.Н. Орловский, С.Н. Долматов, С.А. Войнаш

Приведены результаты исследований лесохозяйственного агрегата, состоящего из трактора ЛХТ-55 и специальных лесных плугов ПКЛ-70 и ПЛШ-1,2 при работе в условиях нераскорчеванных вырубок. Установлено, что для более эффективного использования трактора при подготовке почвы на вырубках орудиями плужного типа, необходимо повысить рабочие скорости до 3,9 - 5,1 км/ч с соответствующим увеличением мощности двигателя и момента инерции агрегата, приведенного к коленчатому валу двигателя.

Ключевые слова: агрегат, загрузка, момент инерции, перегрузки, мощность.

Исследования лесохозяйственных агрегатов в производственных условиях показывают, что они работают при неустановившейся нагрузке. Степень возможного использования полной энергии двигателя, определяемой номинальным режимом его работы, зависит от характеристики приведённого момента сопротивления к коленчатому валу двигателя и от динамических свойств агрегата [1, 2, 5]. Оптимальные значения коэффициента загрузки двигателя, работающего при неустановившейся нагрузке, в соответствии с исследованиями В.Н. Болтинского [1], следует определять по выражению:

$$K_{з.опт.} = 1 - (K_{д.ср.} - K_{ср.\ опт.}), \quad (1)$$

где $K_{д.\ ср}$ – характерное максимальное значение коэффициента динамичности при определенной длительности увеличения нагрузки; $K_{ср,опт}$ – оптимальное значение момента сопротивления.

Известно, что изменения нагрузки, вызывающие существенные изменения режима работы двигателя, являются случайной функцией времени и имеют длительность $\tau \geq 0{,}5$ с. [1 - 5].

Материалы и методы исследования. С целью выявления возможностей трактора ЛХТ-55 при лесовосстановительных работах на нераскорчеванных вырубках он был испытан с плугами ПКЛ-70 и ПЛШ-1, 2, а также с лесопосадочной машиной ЛМС и культиватором КЛБ-1,7. Агрегат был оснащен необходимой аппаратурой для записи

крутящего момента, оборотов двигателя, тягового сопротивления орудий, оборотов ведущих колес, пройденного пути, расхода топлива [6-8].

Крутящий момент замерялся на карданном валу трактора, в котором жесткое соединение заменено более податливым (торсионным валом). В качестве датчика использовался ЛВТ (линейный вращающийся трансформатор). Напряжение с клемм ЛВТ, пропорциональное по своей величине углу закручивания торсионного вала, а, следовательно, и крутящему моменту, передавалось через токосъёмник на осциллограф. Следует отметить, что при исследовании длительных изменений нагрузки колебания инерционных масс трансмиссии, не сказывались на формировании нагрузки на коленчатом валу двигателя, т. к. жесткость валов трансмиссии значительно больше, чем жесткость внешних сопротивлений.

Для записи оборотов коленчатого вала двигателя на осциллограмму в качестве датчика использовался тахогенератор ТГП-3, привод которого осуществлялся от вала КПП.

Тяговое сопротивление навесных орудий замерялось с помощью тензометрических пальцев, устанавливаемых в механизме навески трактора для соединения с навесными орудиями. В качестве датчиков использовались мощные фольговые тензометрические датчики, позволяющие применить безусилительную схему замера. Число оборотов ведущих колес записывалось на осциллограмму с помощью импульсных датчиков, устанавливаемых на малые шестерни бортовой передачи. Пройденный путь замерялся путеизмерительным колесом с установленным в нем импульсным датчиком и замерами геодезической мерной лентой.

Расход топлива при работе агрегата замерялся с помощью мерного бачка визуально [9].

Измерительная аппаратура и источники ее питания размещались на борту трактора, что обеспечило возможность проведения испытаний в производственных условиях без каких-либо ограничений. Длина мерного гона определялась из условия получения достаточного количества замеров для характеристики изменения момента сопротивления, приведенного к коленчатому валу двигателя по следующей зависимости [3, 4, 5]:

$$S=V\cdot t\cdot n, \qquad (2)$$

где V – скорость движения агрегата, м/с; t – время, через которое измеряются значения крутящего момента, равное 0,5 сек; n – количество необходимых замеров, определяемое по таблице больших чисел [3].

Результаты и обсуждение. Из статистического анализа данных испытаний следует, что наиболее характерные максимальные значения коэффициента динамичности $Кд_{ср}^{макс}$ при работе трактора с плугами ПКЛ-70 и ПЛШ-1,2 равняются 1,5-1,7. Значения $Кд_{ср}^{макс}$ >1,7 единичны. Вероятность их появления составляет 2,5 %. Увеличениям нагрузки с $Кд_{ср}^{макс}$= 1,5-1,7 соответствует вероятная длительность τ = 2 с (при $V_р$ = 0,65-0,85 м/с). Возможная динамическая реакция агрегата $К_{ср}$ в соответствии с проведенными расчетами и экспериментальными данными при τ = 2 с равняется 1,35. Оптимальное значение коэффициента загрузки двигателя $К_{з.опт}$ по уравнению (1) при $Кд_{ср}^{макс}$ =1,7 равняется 0,65. Коэффициент загрузки двигателя по моменту Кз при работе трактора с плугом ПКЛ-70 в зависимости от жесткости условий составил: на первой передаче 0,6-0,7, на второй – 0,7-0,8. Работа на третьей передаче невозможна из-за перегрузки двигателя. Работа трактора с плугом ПЛШ-1,2 на вырубках без предварительной расчистки и по расчищенным полосам возможна только на первой передаче с $К_З$=0,7-0,8 [6-8].

При $Кд_{ср}^{макс}$ = 1,5 оптимальное значение коэффициента загрузки двигателя $К_{з.опт}$ = 0,85. В этом случае 10% увеличений нагрузки вызовут остановку двигателя или необходимость перехода на пониженную передачу. В среднем увеличение нагрузки с $Кд_{ср}^{макс}$ >1,5 при работе трактора с плугами ПКЛ-70 и ПЛШ-1,2 встречается один раз на длине гона 32 м. Следовательно, за час чистой работы на второй передаче с $К_З$ = 0,85 вероятно встретить непреодолимую нагрузку 92 раза. Безусловно, это значение варьирует в зависимости от жесткости условий, причем $К_З$ при работе трактора с плугом ПКЛ-70 на второй и с плугом ПЛШ-1,2 на первой передаче лежит в пределах 0,7-0,8; но оно также показывает, что динамические параметры агрегата оказываются недостаточными для форсирования наиболее характерных максимальных увеличений нагрузки. Практически $К_з$ = 0,7-0,8 при работе трактора с плугами на большинстве характерных по условиям вырубок допустимо, хотя и не все увеличения нагрузки преодолеваются без остановки агрегата [9 - 12].

Заключение. Проведенными исследованиями установлено:

1. При работе трактора с плугом ПКЛ-70 на вырубках основной рабочей передачей является вторая, рабочая скорость равна 0,85 м/с, расход топлива под нагрузкой составляет 9-10 кг/час, тяговый КПД трактора лежит в пределах 0,29-0,35.

2. Трактор может быть использован для работы на первой передаче с широкозахватными плугами типа ПЛШ-1,2 (b = 120 см) на слабозахламленных или расчищенных вырубках с небольшим количеством пней. Рабочая скорость трактора равна 0,65 м/с, расход топлива над нагрузкой составляет 8,5-9,5 кг/ч, тяговый к.п.д. трактора равен 0,32-0,35.

3. Трактор целесообразно использовать с лесопосадочной машиной типа ЛМД-1, культиватором КЛБ-1,7 и другими близкими по тяговому сопротивлению машинами и орудиями из-за низких значений тягового к. п. д., равных 0,13-0,27.

Буксование трактора во всех случаях работы не превышало 5%.

Увеличение мощности двигателя трактора ЛХТ-55 по сравнению с трактором – прототипом ТДТ-40М с 40 до 62 л.с., привело к увеличению рабочей скорости при работе с плугом ПКЛ-70 примерно в 1,4 раза (с 1,8-2,16 км/ч до 2,34-3,06 км/ч) и дало возможность работать на первой передаче с широкозахватными плугами, но степень использования мощности двигателя, определяемая допустимыми значениями коэффициента загрузки, значения рабочих скоростей и тягового к. п. д. остались низкими.

Для более эффективного использования трактора на лесовосстановительных работах следует увеличить его энергонасыщенность. С этой целью на основании исследований [5] и данных тяговых испытаний получены значения оптимальных рабочих скоростей и энергетических параметров, которые могут быть рекомендованы для модернизации трактора. Для повышения производительности и улучшения динамических свойств трактора необходимо, чтобы при работе с плугами его рабочие скорости лежали в пределах 3,9-5,1 км/ч. Номинальная мощность двигателя должна составлять 94 л.с., а момент инерции агрегата, приведенный к коленчатому валу двигателя, - 0,54 кгм-с^2. При этих параметрах $К_{з.опт}$ равняется 0,9.

При моменте инерции, приведенном к коленчатому валу двигателя, равном существующему у трактора, двигатель должен быть форсирован до 100-105 л.с. $К_{з.опт}$ в этом случае будет равен 0,8.

Список литературы

1. Болтинский В.Н. Работа тракторного двигателя при неустановившейся нагрузке. М., Сельхозгиз, 1949.
2. Васильев К.В. Исследование загрузки двигателя трелевочного трактора ТДТ-40, канд. диссертация, ЛОЛЛТА, 1962.
3. Заднепровский Р.П. Оценка возможности снижения энергоёмкости и повышения КПД при копании грунтов // Строительные и дорожные машины. 2006. № 12. С. 34-38.
4. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: Изд-во Наука, 1971. 576 с.
5. Стахеев Ю.И. Тяговая динамика лесохозяйственного агрегата // Современные машины и механизмы в лесном хозяйстве. – Красноярск: ВНИИПОМлесхоз, 1973. С. 39-47.
6. Орловский С.Н. Определение энергетических и динамических параметров тракторов, режимов резания активных рабочих органов машинно-тракторных агрегатов. Монография. – Красноярск. Изд-во КрасГАУ, 2011. 376 с.
7. Орловский С.Н. Проблемы экологии, энергосбережения и охраны окружающей среды при выполнении работ в АПК. Монография. – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2020. 265 с.
8. Тургиев А.К. Функционально-экологическое проектирование энергосберегающих систем / А.К. Тургиев, Ю.А. Судник, В. В. Тебнев // Энергосбережение в сельском хозяйстве. Сб. докладов Международной научно-технической конференции (5-7 октября 1998 г.). – М.: Изд-во ВИЭСХ.
9. Пенчук В. А. Пассивные и активные рабочие органы землеройных машин / В. А. Пенчук, В. В. Пенчук // Строительные и дорожные машины. 2003. № 9. С. 36-37.
10. Полетайкин В.Ф. Проектирование лесных машин. Динамика элементов конструкции гусеничных лесопогрузчиков: Учебное пособие для студентов специальностей 1704, 1711 и аспирантов специальности 052101 всех форм обучения / В. Ф. Полетайкин. – Красноярск: КГТА, 1997. 248 с.
11. Чукичев А.Н. Моделирование рабочего процесса землеройно-метательной машины с комбинированным рабочим органом / А. Н. Чукичев, В. И. Варавва, Ю. А. Добрынин // Сб. науч. тр. Лесные пожары и борьба и ними, Л.: ЛеНИИЛХ, 1989. С. 100-108.
12. Яковлев В.Т. Основы проектирования и расчёта почвообрабатывающих машин / В. Т. Яковлев. – Барнаул: АлтГУ, 1994. 96 с.

Саая Сай-Суу Шолбановна, старший преподаватель, sai-suu2014@yandex.ru, Россия, Кызыл, Тувинский государственный университет,

Орловский Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, orlovskiysergey@mail.ru, Россия, Красноярск, Красноярский государственный аграрный университет,

Долматов Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, pipinaskus@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева,

Войнаш Сергей Александрович, младший научный сотрудник, sergey_voi@mail.ru, Россия, Рубцовск, Рубцовский индустриальный институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

EVALUATION OF ENERGY AND TRACTION QUALITIES OF THE LHT-55 TRACTOR

S.Sh. Saaya, S.N. Orlovskiy, S.N. Dolmatov, S.A. Voinash

The article presents the results of studies of a forestry unit consisting of the LHT-55 tractor and special forest plows PKL-70 and PLSh-1.2 when working in conditions of unstumped clearings. It has been established that for more efficient use of the tractor in soil preparation in clearings with plow-type implements, it is necessary to increase the operating speeds to 3.9 - 5.1 km/h with a corresponding increase in engine power and the moment of inertia of the unit, reduced to the engine crankshaft.

Key words: unit, loading, moment of inertia, overloads, power.

Saaya Sai-Suu Sholbanovna, senior lecturer, sai-suu2014@yandex.ru, Russia, Kyzyl, Tuva State University,

Orlovskiy Sergey Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, orlovskiysergey@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University,

Dolmatov Sergey Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, pipinaskus@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,

Voinash Sergey Alexandrovich, junior researcher, sergey_voi@mail.ru, Russia, Rubtsovsk, Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

М.И. Гильдебрандт
Обзор нормативно-технических документов в области энергосбережения …… 3

М.И. Гильдебрандт
Описание методики определения эффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов ……... 5

А.С. Клентак, Е.В. Пантюхина, И.В. Пузиков
Технико-экономический анализ автоматической загрузки универсальными дисковыми бункерными загрузочно-ориентирующими устройствами изделий патронного производства …….. 9

М.В. Помошник, И. В. Наумчик, И.К. Прилуцкий, Ю.В. Татаренко
Экспериментальный стенд для исследования рабочих процессов в поршневом компрессоре и результаты экспериментов …… 13

С.А. Лукин, А.А. Борисов
Особенности разработки конструктивных ограничений на органы захвата и ориентирования универсальных механических дисковых бункерных загрузочных устройств …… 19

А.М. Астанков, А.В. Ляшевский, М.В. Помошник
Способ прогнозирования периодичности неразрушающего контроля технического состояния технологического оборудования наземной космической инфраструктуры на основе построения линейных сплайнов ……... 25

А.Н. Дроздов, Е.Р. Белкина
Компьютерные методы решения динамических моделей механизированного инструмента на примере гидравлических молотков ……. 30

С.Н. Литунов
Об опыте применения электрогидравлического эффекта …… 34

Н.Ю. Мирзоян, М.В. Заморёнов, А.О. Харченко
Имитационная модель для анализа надежности инструмента при резьбонарезании метчиком в глухих отверстиях ……... 38

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Е.Ю. Рогов, В.Е. Овсянников, А.С. Губенко
Совершенствование инструментария оценки рисков применительно к деталям типа ось …… 41

Е.Ю. Рогов, В.Е. Овсянников, А.С. Губенко
Улучшение инструментария обеспечения качества деталей типа ось на этапах жизненного цикла ……... 45

М.Н. Калинин, Н.М. Куприков, С.Г. Изотова
Вопросы формирования технического комитета по стандартизации №170 «Аэростаты и дирижабли»: экономико-управленческие аспекты ……... 50

Н.М. Куприков, Д.О. Доронин
Актуальные вопросы формирования технического комитета по стандартизации №171 «Проектирование лабораторных пространств (дизайн лабораторий)» ……... 53

А.Н. Дергачев, Н.М. Куприков
Предпосылки формирования подкомитета «Авиационно-технические средства морских судов» в составе технического комитета по стандартизации №005 «Судостроение»: экономико-управленческие аспекты ……... 54

Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков
Принцип полета как основной классификационный принцип идентичности летательных аппаратов …… 57

Я.С. Абрамов, Н.М. Куприков
Анализ экономических аспектов деятельности технических комитетов по стандартизации в сфере авиационной и ракетно-космической отраслей …… 67

Н.М. Куприков, М.Ю. Куприков, Д.О. Доронин, В.А.Шефлер
Вопросы применения фонда документов по стандартизации в сфере международной стандартной атмосферы в авиационной отрасли ……... 72

Н.М. Куприков, Д.О. Доронин
Решение вопросов метрологического обеспечения производства государственного флага Российской Федерации за счет применения стандартизации …… 75

Д.Е. Миронов, Ю.В. Будкин, Н.М. Куприков, А.Г. Зайцев, А.А. Горяинов, В.Г. Красилов, А.А. Стреха, М.Ю. Куприков
Экономико-управленческие предпосылки разработки профессионального стандарта «Специалист по стандартизации» ……... 77

А.Р. Совина
Примеры автоматизации технологических процессов современных швейных производств ……... 88

Г.Г. Бурый, Р.Ф. Салихов, И.К. Потеряев
Метод входного контроля деталей автомобилей ……... 93

И.А. Кочанов, А.С. Мусиенко, Г.М. Горохов
Методика контроля технического состояния сложного технического устройства, мониторинг показателей надежности ……... 96

О.А. Голубева, В.П. Димитров, А.С. Доний, К.А. Швецов
Многокритериальный анализ технологического процесса производства обуви на основе автоматизированной системы …….. 103

А.Ю. Албагачиев, В.А. Пухальский, И.М. Сидоров
Структурный подход к обеспечению качества продукции ……... 107

А.Ю Албагачиев, М.Н. Ерофеев, В.А. Пухальский, И.М. Сидоров
Цифровой двойник паспортных характеристик машиностроительной продукции ……... 111

И.А. Беляева
Актуальные вопросы обеспечения информатизации и цифровизации в автосборочном производстве …….. 115

И.А. Беляева, В.Н. Козловский, А.С. Подгорний, А.В. Гусев
План управления качеством при проектировании машиностроительной продукции …… 120

В.Г. Мосин
Методология поиска и оценки предиктивной модели обращений в пункты гарантийного обслуживания автомобилей …….. 126

В.Г. Мосин, В.Н. Козловский, С.А. Васин, О.В. Пантюхин
Детекция аномалий в процессе гарантийного обслуживания автомобилей по методике MCCP (modeling, calibration, challenge, production) …… 132

Д.И. Панюков, О.В. Никишов, С.А. Васин, О.В. Пантюхин
Статистическое моделирование процесса сервисного обслуживания автомобилей …….. 142

Д.Р. Уразметова
Совершенствование инструментов организации отзывных кампаний новых автомобилей ……. 146

И.И. Хабибуллин
Совершенствование инструментов организации рекламационной деятельности в автосборочном производстве …….. 149

А.С. Клентак
Развитие системы менеджмента качества автопроизводителя в условиях создания промсборки …… 151

В.Н. Козловский, А.С. Клентак, Д.И. Благовещенский, Н.А. Антонова
Инструментарий исследования удовлетворенности потребителей и качества автомобилей в эксплуатации при выходе автопроизводителей на новые рынки …….. 161

Е.К. Савич, Д.В. Антипов
Структурная модель цифровой платформы системы менеджмента качества ……. 172

С.М. Никольский
Особенности проведения измерений на КИМ с применением трехмерных моделей исследуемых объектов …….. 177

Т.А. Мустафаев, С.А. Трифонов
Методика расчёта нормативов накопления (образования) отходов в зависимости от комплекса технологий, применяемых на их переработку (на материалах Республики Татарстан) …… 180

С.М. Никольский
Рекомендации по измерению нетиповых геометрических элементов на КИМ …….. 183

И.А. Сафронова, Т.В. Харитонова
Совершенствование измерений параметров габаритов железнодорожной инфраструктуры и пассажирских обустройств …… 186

Д.В. Усачев
Оценка влияния внешних факторов на качество авиационной техники ……. 188

С.М. Никольский
Методы контроля параметров зубчатых колес с использованием координатно-измерительных машин …… 192

А.Г. Ивахненко, М.С. Разумов, П.Н. Савин, П.В. Глазков, О.Н. Мальцев
Способ выявления скрытых дефектов в литых заготовках ……... 195

И.Е. Ильин, А.С. Путенихина, Ю.А. Извеков, В.В. Шеметова
Анализ техногенной безопасности как комплексного показателя качества металлургической отрасли России ……. 201

В.В. Куц, А.Н. Гречухин, А.С. Горшенина, А.В. Олешицкий
Определение величины биения оси шейки вала относительно оси вращения при контроле геометрической точности методами машинного зрения ……... 204

К.С. Буяров, Н.В. Анцева, В.Ю. Анцев, А.Д. Горынин
Управление качеством процесса перевозки негабаритных транспортно-технологических машин автомобильным транспортом ……... 211

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

А.С. Подшибякин, О.М. Степанюк
Разработка и применение метода оперативного выявления HTTP-туннелирования в сетевом трафике информационно-телекоммуникационных систем …….. 217

Т.А. Акименко, Е.В. Филиппова
Проблемы контроля тепловизионных измерительных приборов ……. 224

И.А. Кочанов, Ю.Л. Плеханов, А.В. Смирнов
Порядок определения «мест» поддержки принятия решений с учетом взаимодействия между уровнями управления организационно-технической системы ……. 226

А.Ф. Кулакова
Применение медианного и адаптивного фильтра для обработки спутниковых снимков …….. 229

М.С. Токарев, А.В. Смирнов
Оценка качества управленческих решений в процессе функционирования организационно-технических систем ……. 233

В.Ф. Овчаров
Расширение возможностей тренажерной базы путем внедрения симуляторов подготовки контроля работы комплекса …….. 236

В.А. Дышлевский, В.Ю. Кобенко, И.С. Кудрявцева, А.П. Науменко
Эффективность FFTW и MATH.NET: анализ времени вычисления преобразования Фурье в зависимости от параметров ……. 240

А.В. Блохин
Обнаружение и прогнозирование нештатных состояний оборудования на предприятии на основе ретроспективных данных об электропотреблении …… 243

А.Ю. Горшенин, А.С. Грицай, В.Ю. Кобенко, Е.Г. Андреева
Прогнозирование электропотребления с использованием доверительных интервалов …… 249

А.С. Сабельников, Н.А. Серебряков, С.О. Хомутов,
Е.Г. Андреева, А.М. Парамонов, В.Ю. Кобенко, А.П. Науменко
Алгоритм и метод обработки слабоструктурированной информации о технологических нарушениях в электрических сетях напряжением 0,4…10 кВ с применением регулярных выражений ……... 252

С.В. Шабунин
Верификация программного обеспечения системы прогнозирования объемов продаж торговой организации …… 257

А.В. Блохин
Разработка и верификация системы краткосрочного прогнозирования электропотребления ресурсоснабжающего предприятия ……. 261

А.А. Закутаев, А.А. Михайлов, В.М. Лизан
Исследование вопросов обнаружения удаленных объектов в условиях априорной неопределенности их положения в поле зрения оптико-электронного средства …… 268

А.С. Грицай, А.В. Шимохин, А.А. Лучинович, С.Н. Болтовский, А.Е. Симоненко, И.В. Червенчук
Разработка информационной системы мониторинга количества плодов томатов и их состояния с использованием технологии компьютерного зрения …….. 273

И.М. Слабженникова
Применение системы компьютерной алгебры MAXIMA для моделирования процессов в электрических цепях ……... 287

Е.Е. Майоров, Ю.М. Бородянский, Р.Б. Гулиев, А.В. Дагаев, И.С. Таюрская
Источники излучения для когерентно ограниченных интерференционных приборов и систем ……. 291

А.Г. Колесникова, В.В. Матвеев
Информационно-измерительная система волномерного буя для определения параметров морской волны …….. 295

И.А. Матыцина, В.В. Баркалов, В.С. Науменко
Мультисверточная нейросеть для определения сигналов акселерометра и анализа производственной активности …….. 299

П.В. Черкасова, В.В. Матвеев
Задача сближения двух роботов при управлении по лазерному каналу связи ……... 302

Е.Е. Майоров, В.В. Курлов, А.В. Арефьев, В.П. Пушкина
Исследование амплитуды сигнала в низкокогерентном свете при длине временной когерентности излучения порядка 6,8 МКМ …… 305

А.Ю. Кагазежев
Концепция автоматизации проектирования капитального ремонта МКД с использованием систем ИИ ….. 309

П.А. Рудакова, Т.А. Семенов
Распознавание эмоций в звуках толпы посредством анализа спектрограмм сверточными нейронными сетями ……. 313

А.С. Сазонова, А.А. Кузьменко, Л.Б. Филиппова, А.А. Курдин
Использование методов интеллектуального анализа данных для прогнозирования трендов ……... 316

В.С. Павлова
Исследование алгоритмов формирования и проверки электронной подписи на основе эллиптических кривых …… 322

Т.Х. Бидов, А.О. Хубаев, А.Г. Гаврилова, С.Д. Черноглазов
Методика оценки влияния на окружающую застройку объекта в рамках реновации ……... 326

А.Я. Моргунов, Е.В. Комаров, А.А. Бурлаков, А.И. Муравьев
Общие походы к оценке эффективности волоконно-оптических систем передачи ……... 332

Д.А. Первухин, С.К. Нейрус, О.В. Афанасьева
Применение имитационного моделирования на предприятии нефтегазового сектора ……. 334

С.Ш. Саая, К.В. Кенден
Метод оценки несущей способности конструкций …… 340

Е.М. Леонова, А.Н. Леонова
Актуальные вопросы оповещения населения крупных городов …….. 343

П.А. Рудакова, Т.А. Семенов, А.А. Сычугов, В.В. Котов
Определение уровня удовлетворенности клиента в CALL-центрах …… 346

Ю.А. Леонов, Р.А. Филиппов, Г.В. Царева, А.А. Курдин
Модели и методы анализа погодных изменений под воздействием окружающих факторов ……... 352

Д.В. Топчий, З.Х. Чипова
Технологические особенности устройства подпорных стен методом буросекущих свай ……. 357

А.С. Путенихина, И.Е. Ильин, Ю.А. Извеков, В.В. Шеметова
Системный подход к усовершенствованию управления кислородно-конвертерным цехом металлургического предприятия …….. 359

Д.А. Ещенко, Г.В. Абрамов
Распознавание сигналов кашля с использованием мел-спектрограмм и сверточных нейронных сетей …….. 364

Е.М. Леонова, А.Н. Леонова, Д.С. Котлячков
К вопросу о персонализации оповещения населения ……... 373

Г.А. Тюкаева, Л.Б. Филиппова, Р.А. Филиппов, А.А. Кузьменко
Разработка математических правил баланса ролевой системы на примере персонажа компьютерной игры ……. 376

С.И. Носков, А.Р. Чекалова
Связь приращения оптимального значения функции потерь с изменением оценок параметров кусочно-линейной регрессионной модели …….. 380

В.И. Скель, Б.А. Кайтуков
Тяжелые монтажные роботы в строительных технологиях …….. 384

М.М. Бычковский, Н.Н. Зайкин, Р.И. Кочубей, Е.В. Фатьянова, О.В. Чуприков
Критерии оценки надежности функционирования распределенной высокопроизводительной сети …….. 388

К.М. Чубаров, Ф.А. Сабадаш, О.В. Пантюхин, А.В. Стариков
Выбор способа косвенного определения динамического уровня жидкости в скважине ……... 392

В.Р. Гапонов, Е.В. Ляпунцова
Использование когнитивных моделей с целью повышения качества образовательных технологий ……... 397

П.А. Рудакова, В.И. Рудаков
Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения голосовой активности в системах речевого анализа ……. 401

Л.Б. Филиппова, Ю.А. Леонов, А.С. Сазонова, Е.С. Музалевский
Разработка и реализация математической модели для поиска оптимальной конфигурации ПК ……. 404

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Ю.А. Темпель, С.И. Митрохин
Исследование применения аддитивных технологий для получения мастер-модели в литейном производстве …….. 411

Д.Е. Писарев, С.И. Митрохин, А.С. Губенко, У.С. Путилова
Термическая закалка пластиковых стержней, напечатанных методом горизонтального послойного нанесения материала ……. 418

О.А. Темпель, Ю.А. Темпель
Совершенствование процесса расчета надежности технологических систем …… 422

Д.Д. Какорин, Б.И. Марголис, А.Ю. Лаврентьев
Программная оптимизация температурно-временного режима аддитивного производства металлических изделий ……. 426

А.В. Морозов, А.Н. Еремеев, Ю.С. Иванова, М.А. Карпенко, О.М. Каняева
Моделирование напряженно-деформированного состояния при несвободном объемном электромеханическом дорновании тонкостенных стальных втулок …… 431

А.В. Королев, А.А. Перегородов, А.А. Королев, П.Н. Резанов
Моделирование режущей способности абразивного инструмента при многобрусковом роторном суперфинишировании ……... 436

Л.А. Толоконников, Д.В. Окороков
Рассеяние плоской звуковой волны неоднородным сфероидом с жестким шаровым включением ……. 441

Д.Д. Вагазова, Р.Р. Тляшева
Анализ напряженно-деформированного состояния полотнища резервуара в процессе рулонирования на каркасы различных диаметров …… 447

А.Х. Габбасова, Р.Р. Юсупов, В.В. Масловская
Исследование напряженно-деформированного состояния с учетом вынужденных колебаний трубопровода этилена с нагнетания компрессора …….. 452

А.О. Кунафина, С.В. Чертовских
Надежность электрических жгутов геофизических приборов …….. 458

Э.М. Мусабиров, М.А. Бикмухаметова, С.В. Чертовских, А.В. Рубцов, Р.Э. Миргаязов
Об информационной системе сопровождения технического обслуживания и ремонта технологического оборудования нефтехимических предприятий ……... 461

Д.В. Окунев, М.А. Семашко, Э.Г. Балышева, С.В. Чертовских
Исследование влияния дефектов формы отливки деталей впускного тракта на мощность ДВС ……. 466

С.В. Чертовских, А.О. Кунафина, А.В. Рубцов, М.В. Демченко, И.Р. Хакимова
Совершенствование технологии изготовления жгутовых изделий …….. 475

Т.И. Дородных, А.В. Парамонов
Усталостное разрушение пьезокерамических преобразователей при циклических нагружениях ……... 478

С.А. Петров
Способы повышения производительности и времени непрерывной работы закалочных туннелей …… 484

Е.С. Постникова
Факторы эффективности машиностроительного производства ракетно-космической техники ……... 486

В.А. Пухальский, О.О. Офицеров, И.М. Сидоров
Надёжность крепления сменной многогранной пластины на штифт при торцовом фрезеровании ……. 492

С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев, А.А. Калинин, В.В. Воинова
Использование порошковых покрытий для повышения долговечности литейных пресс-форм …….. 495

В.А. Коротков, А.Н. Чуканов, Е.В. Цой, А.А. Фролов
Определение неоднородности материала в изделиях технологии SLM в ходе испытаний на растяжение …. 500

А.А. Гончаров, В.М. Утенков, В.А. Иванов
Эффективные методы контроля и восстановления геометрической оси вращающейся печи после механической обработки опорных узлов …… 506

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Е.С. Половинкин, М.С. Чванова
Анализ проблем при разработке СППР для автоматизации формирования рационов питания специализированных групп …….. 512

О.В. Горячев, К.Н. Калиничев
Методика формирования базы знаний для нейронечеткого регулятора, реализующего квазиоптимальное по быстродействию управление приводом оптико-электронной системы ……. 520

О.В. Горячев, К.Н. Калиничев
Анализ методов настройки, оптимизации и адаптации ПИД-регуляторов ……. 526

Е.С. Половинкин, М.С. Чванова
Анализ публикационной активности исследователей мира по проблеме создания системы поддержки принятия решений в пищевой промышленности ……... 531

К.В. Лицин, А.А. Клименко, И.А. Ореховский
Исследование моделей векторного управления с ориентацией по потокосцеплению ротора …….. 528

К.В. Грищенко, А.А. Жиленков
Идентификация параметров управления движением манипуляторов параллельной структуры
в условиях ограничений …… 542

Э.И. Тихонов, Д.И. Опрышко
Алгоритм формирования тестов с использованием технологии WORD2VEC для выявления уязвимостей
программного обеспечения …….. 546

Т.Э. Хаев, Б.А. Айдаров
Инновационные технологии бетонирования в современном строительстве …….. 553

К.С. Галицков
Годограф вектора управляющих воздействий многомерной САУ высокотехнологичным оборудованием
производства бетонных и керамических материалов и изделий …….. 555

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Д.А. Хакимов, Д.И. Чистов, Э.Ш. Имаева
Повышение точности определения остаточного ресурса фрезерной компоновки ……. 559

И.С. Говоров
Исследования влияния параметров FDM-печати на физико-механические свойства изделий
из полиэфирсульфона …… 562

Е.И. Яцун, Г.В. Урванцев
Роботизированный технологический комплекс на базе токарного центра ……. 566

Ю.А. Мальнева, В.В. Куц, А.Н. Кальченко, Т.А. Толмачева, Г.В. Урванцев
Исследование погрешности формообразования РК-профильных валов охватывающей фрезой
с радиальной конструктивной подачей ……... 570

С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев, А.А. Калинин, В.В. Воинова
Особенности формировании диффузионного защитного слоя на деталях пресс-форм …….

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

К.С. Димитров, Л.Н. Козаченко, И.В. Антипенко, Т.С. Медведева
Повышение надежности функционирования электрических систем буровых платформ ……. 581

В.В. Кирюха, Ю.М. Горбенко
Выбор методов контроля дефектов ферромагнитных поверхностей большой площади ……... 586

П.Ю. Грачев, И.А. Федулов
Особенности расчета и перспективы применения интегрированных коллекторных машин
в транспортных средствах …… 590

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

М.В. Ларина, И.С. Хрычев, Г.А. Нуждин
Оценка параметров инструмента на напряженно-деформированное состояние материала заготовки …… 594

А.В. Морозов, И.Е. Никоноров, А.О. Кошкина, В.А. Злобин, О.М. Каняева
Электроконтактный нагрев титановых сплавов перед штамповкой …… 598

Н.И. Федоринин
Движение осесимметричного тела при предельном сцеплении с поверхностью ……... 602

М.А. Петров, Д.Х. Чан
Применение технологий 3D-печати при изготовлении инструментов для формообразующих
и разделительных операций для мелкогабаритных листовых деталей …… 607

В.А. Коротков, А.Н. Чуканов, Е.В. Цой, А.А. Фролов
Оценка параметров неоднородности анизотропных изделий на основе интенсивности их деформации
растяжением ……... 614

О.Г. Ветков
Контроль и повышение качества изделий штамповочного производства ……... 621

С.С. Яковлев, А.А. Шишкина
Анализ температуры инструмента при продольном гофрировании обжимом ……... 623

М.А. Петров, Д.Х. Чан
К определению точности изготовления формообразующего инструмента для микровытяжки по технологии 3D-печати …….. 626

Е.М. Чунаева
Применение компьютерного моделирования для прогнозирования износа штампового инструмента ……... 629

И.В. Гребенщиков
Анализ перспективных направлений использования импульсных методов обработки …… 631

И.В. Гребенщиков
Исследование температуры полуфабриката при продольном гофрировании обжимом …… 634

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

Н.В. Дульгер, А.В. Кораблин
Проектирование грузонесущих траверс для портовых грузов ……. 636

С.Ю. Лозовая, Н.М. Лозовой, А.Е. Боровской, С.И. Анциферов
Метод бинарных матриц для анализа траекторий транспортных потоков на пересечениях ……... 644

А.О. Дворянкин, Н.И. Баурова
Перспективы внедрения технологий 3D-печати в литейное производство …… 649

В.Н. Добромиров, У.Н. Мейке, К.И. Фомин
Оценка нагруженности унифицированных элементов ходового привода жесткорамных и шарнирно-сочлененных автосамосвалов ……. 651

А.В. Зазыкин, С.В. Репин, К.А. Головин, Н.А. Масленников, Г.Н. Белик
Метод оценки влияния условий эксплуатации на надежность транспортно-технологических машин ……... 659

В.В. Михеев, И.А. Угрюмов, Б.А. Раздобарин
Принципы повышения эффективности уплотняющих дорожно-строительных машин …… 663

М.А. Степанов, Б.А. Кайтуков, П.О. Андреева
Повышение комфорта пассажиров при снижении динамических нагрузок лифтов …….. 668

Д.В. Фурманов, Т.А. Краснобаев
Комбинированный подход к рабочему процессу разрушения железобетонных изделий ……. 672

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

А.И. Олейник, Л.Э. Петросян
Сравнительный анализ алгоритмов кластеризации при оптимизации файловых систем …….. 679

А.М. Григорьев, Л.Е. Алёхин
Перспективы развития технологии дополненной реальности в медицинской сфере …… 683

Р.С. Каширин
Сравнительный анализ нативного и кроссплатформенного подходов к разработке мобильных приложений …… 686

А.М. Клочек, Н.Д. Садчиков
Анализ влияния агент-ориентированного моделирования на принятие решений в бизнесе …… 691

К.Е. Никкель, А.А. Сосунов, Л.Э. Петросян
Особенности использования и хранения в памяти ЭВМ значений, соответствующих форме представления чисел с плавающей точкой согласно стандарту IEEE 754 …….. 695

А.А. Шмаков, М.А. Одиноков, Л.Э. Петросян
Сравнительный анализ библиотек реализации пользовательского интерфейса на языке C++ ……. 701

А.С. Потемкин, К.А. Узоров, Л.Э. Петросян
Анализ российских платформ для хранения и управления DOCKER-образами …… 704

М.А. Раджапов, К.Д. Чемухин, Л.Э. Петросян
Анализ перспектив Kotlin Multiplatform для кроссплатформенной мобильной разработки ……. 708

Д.О. Судьина, Л.Э. Петросян
Оптимизация взаимодействия СО НКО и студенческими IT-стартапами посредством онлайн-платформы ……..... 714

А.В. Шмат
Применение больших языковых моделей и технологии RETRIEVAL-AUGMENTED GENERATION для корпоративных ассистентов …….. 720

И.А. Лобзин
Анализ возможностей автоматизации процесса приоритезации пользовательских запросов …….. 726

МАШИНОВЕДЕНИЕ

М.С. Дзитоев, Ю.В. Татаренко
Обоснование применения химически реагирующих рабочих веществ в солнечной газотурбинной установке ……..... 729

Е.И. Яцун, И.Е. Дергачев
Редуктор для галтовочной машины …… 734

С.Ш. Саая, С.Н. Орловский, С.Н. Долматов, С.А. Войнаш
Оценка энергетических и тяговых качеств трактора ЛХТ-55 ……... 739

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 10

Редактор О.И. Борискин

Компьютерная правка и верстка – Б.С. Яковлев

Учредитель:
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97
Подписано в печать 18.11.24. Дата выхода в свет 25.11.24
Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная
Усл.-печ. л. 122,04
Тираж 500 экз. Заказ 144
Цена свободная

Адрес редакции и издателя:
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95