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 11

Тула
Издательство ТулГУ
2023

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

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

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

Ответственный секретарь редакционного совета
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).

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, 2023
© Издательство ТулГУ, 2023

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 629.05
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-3-4

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В СУДОХОДНЫХ АКВАТОРИЯХ

Ю.И. Стародубцев, Н.А. Иванов, В.Ф. Самохин, М.В. Митрофанов, А.В. Вершенник

В статье представлен вариант применения телекоммуникационной инфраструктуры на основе оптоволоконных кабелей для навигации подвижных объектов, а именно, для идентификации судов и управлением судоходством в акватории. Предложена система определения местоположения судов, позволяющая обеспечить регистрацию виброакустических воздействий для дальнейшей идентификации объектов воздействия по их индивидуальным виброакустическим признакам за счет применения пространственно-распределенного преобразователя акустических воздействий на основе оптического волокна, которое используется в качестве датчиков гидроакустических воздействия.

Ключевые слова: навигация, идентификация, определение местоположения, управление судоходством в акватории, оптоволоконный кабель.

Постановка задачи. С развитием морского судоходства, ростом интенсивности транспортных потоков особо важное значение приобретает вопрос создания высокоточных систем навигации в акваториях, значимых для Российской Федерации, обеспечивающих безопасность судоходства, обеспечивающих отслеживание положения судна для определения координат, корректировки дальнейшего курса и контроля передвижения транспортных средств. В качестве первичных информационных датчиков при решении задач позиционирования, навигации и причаливания в настоящее время используются глобальные навигационные системы (ГЛОНАСС, GPS, фазовые радиотехнические навигационные системы), локальные судовые навигационные средства, оптические и оптико-электронные датчики, навигационные РЛС (корабельные, береговые и портовые) [1, 2].

Однако в сложных геофизических и метеорологических условиях, при воздействии различного рода помех, как естественных, так и искусственных, возможны нарушения в работе глобальных навигационных спутниковых и других радиотехнических систем. Необходимо отметить, что в таких условиях глобальные навигационные системы работают неустойчиво и не обеспечивают точности, удовлетворяющей современным требованиям к качеству позиционирования и проводки плавсредств [1 – 4].

Локальные судовые навигационные средства, основанные на комбинировании гироскопических датчиков с навигационными приемниками ГЛОНАСС/GPS, имеют тот же порядок точности. К основным недостаткам таких систем относятся также — необходимость их первоначальной настройки и накопление ошибок со временем [1, 5, 6].

Оптические и оптоэлектронные датчики обладают невысокими точностными и эксплуатационными параметрами, что обусловлено спецификой лазерных лидарных систем [1, 7].

Навигационные радиолокационные системы считаются единственным средством, обеспечивающим «слепые» проводки в сложных метеоусловиях. Однако ни одна из отечественных и зарубежных радиолокационных станций, представленных в перечне Российского морского регистра судоходства, не обладает требуемыми качествами для обеспечения решения задач управления маневрированием судна в стесненных и опасных акваториях. Проведенные исследования показали, что радиолокационные способы навигации оказались значительно менее точными по сравнению со спутниковыми системами навигации [1, 8].

Таким образом, создание сверхточных радионавигационных систем, развертываемых для обеспечения навигационных потребностей в акваториях с повышенной сложностью судовождения, является одним из наиболее актуальных задач.

Система навигации судов на основе пространственно-распределенного преобразователя акустических воздействий на базе оптического волокна. В предлагаемой системе навигации судов для идентификации объектов, определения их скорости и направления движения применен пространственно-распределенный преобразователь акустических воздействий (ПРПАВ) на основе оптического волокна (ОВ), которое используется в качестве датчиков гидроакустических воздействия и обеспечивает их регистрацию.

Принцип действия ПРПАВ на основе ОВ реализован на принципе действия оптического рефлектометра. В ОВ (ПРПАВ) лазером вводится мощное измерительное оптическое излучение и анализируются характеристики рассеянного на примесях, распределенных по всей длине ОВ (ПРПАВ), отраженного назад оптического излучения. За счет чувствительности приемной части измерительного модуля к фазовой (амплитудной, частотной, поляризационной) модуляции (например, при использовании интерферометра Маха-Цендера в ПРПАВ возможно, как измерение виброакустических колебаний по всей тестируемой длине волокна, так и локализация измерения на любом его участке, за счет разного времени возврата отраженных от примесей оптических сигналов [9 – 14].

На рисунке 1 представлена структурная схема системы навигации судов, раскрывающая воздействие судна на ПРПАВ и взаимодействие ее подсистем и устройств.

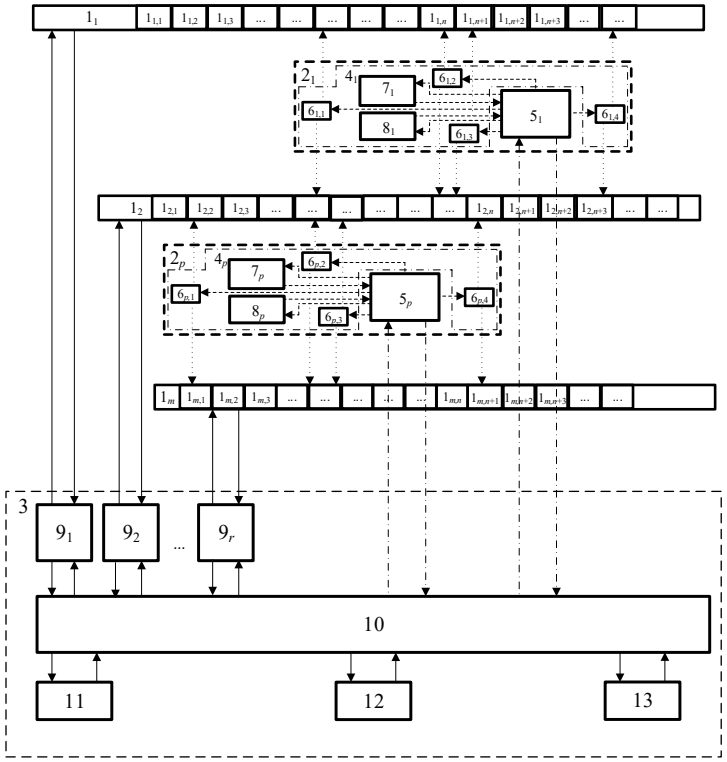


Рис. 1. Структурная схема системы навигации судов

Система навигации судов содержит:
M волоконно-оптических кабелей $1_1..1_M$, проложенных по дну акватории;
судовую аппаратуру $2_1..2_p$;
подсистему контроля и управления судоходством акватории 3.
При этом судовая аппаратура включает:
подсистему идентификации и определения местоположения судна $4_1..4_p$;
судовую подсистему передачи данных $5_1..5_p$.
Подсистема идентификации и определения местоположения судна 5 включает:
излучатели виброакустических сигналов судна $6_{1,2}..6_{p,4}$;
устройство управления $7_1..7_p$;
устройство отображения $8_1..8_p$.
Подсистема контроля и управления судоходством акватории 3 состоит из:
устройств регистрации виброакустических воздействий $9_1..9_r$;
подсистемы передачи данных 10;
распределенной базы данных 11;
устройства управления навигацией судов 12;
устройства отображения навигационной обстановки акватории 13.

Волоконно-оптические кабели (ВОК) 1 используются в качестве чувствительных элементов и эквивалентны K_n приемникам виброакустических сигналов.

Судовая аппаратура 2 размещается на судах и служит для взаимодействия с подсистемой контроля и управления судоходством в акватории 3 и организации подсистемы идентификации и определения местоположения судов 4.

Подсистема контроля и управления судоходством акватории 3 предназначена для мониторинга, контроля и управления судоходством в акватории, а также взаимодействия с судовой аппаратурой 2.

Подсистема идентификации и определения местоположения судна 4 предназначена для назначения идентификационных признаков судна и их управлением посредством устройства управления 7, излучения назначенных идентификационных признаков судна излучателями виброакустических сигналов судна 6 в направлении дна акватории, приема и обработки исходных данных от подсистемы контроля и управления судоходством акватории 3, отображения навигационной обстановки в акватории на устройстве отображения 8.

Судовая подсистема передачи данных (СППД) 5 предназначена для взаимодействия элементов судовой аппаратуры 2 между собой и взаимодействия по средствам подсистемы передачи данных (ППД) 10 с устройством управления навигацией судов 12.

Излучатели виброакустических сигналов судна 6 предназначены для приема индивидуальных параметров излучения от устройства управления 7 и излучения направленных гидроакустических сигналов в направлении дна акватории в соответствии с принятыми параметрами.

Устройство управления 7 предназначено для управления элементами судовой аппаратуры 2, передачи параметров излучения излучателям виброакустических сигналов 6, приема по средствам СППД 5 и ППД 10 исходных данных от устройства управления навигацией судов 12, формирования и выдачи на основании полученных исходных данных на устройство отображения 8 навигационных параметров по средствам СППД 5, навигационную обстановку в акватории, предложений по организации маршрутов прохода судна в акватории.

Устройство отображения 8 предназначено для визуальной индикации навигационных параметров, навигационной обстановки, маршрутов прохода судна на графической модели акватории, а также отображение органов управления судовой аппаратурой 2 и служебной информации.

Устройство регистрации виброакустических воздействий 9 предназначено для излучения светового потока в ОВ подключенного ВОК 1, приема отраженного от примесей и неоднородностей ОВ обратного светового потока, регистрации изменений в результате гидроакустического (вибрационного) воздействий на ОВ отраженного светового потока в ОВ, оценки результатов регистрации, вычисления координат и регистрации идентификационных признаков объектов воздействия, передачи результатов мониторинга в виде исходных данных по средствам подсистемы передачи данных 10 на устройство управления навигацией судов 12.

Подсистема передачи данных 10 предназначена для взаимосвязи между элементами подсистемы контроля и управления судоходством акватории 3, а также обеспечения взаимодействия подсистемы контроля и управления судоходством акватории 3 с судовой аппаратурой 2.

Распределенная база данных 11 предназначена для хранения шаблонов индивидуальных идентификационных признаков судов. В базу данных может быть занесен не один эталон на один объект, а P эталонов. Увязывая эталоны с режимом движения судна, становится возможным определить его скорость и степень загрузки.

Устройство управления навигацией судов 12 предназначено для оценки полученных от устройства регистрации виброакустических воздействий 9 исходных данных, для чего производит сравнение полученных данных от устройства регистрации виброакустических воздействий с идентификационными признаков объектов воздействия, хранящимися в распределенной базе данных 11 и получаемых по средствам ППД 10, осуществляет обработку результатов сравнения, вычисление навигационных характеристик идентифицированного судна, формирование навигационной обстановки в акватории, выдачу по средствам ППД 10 навигационный обстановки на устройство отображения навигационной обстановки акватории 13, передачу навигационных характеристик судов и навигационной обстановки по средствам ППД 10 на суда в виде исходных данных (координаты, признаки объекта воздействия на ВОК 1 и т.д.).

Устройство отображения навигационной обстановки акватории 13 предназначено для визуального отображения навигационных параметров, навигационной обстановки, маршрутов прохода судна на графической модели акватории, а также отображения органов управления навигацией акватории и служебной информации [14].

Принцип функционирования системы навигации судов:

Принцип функционирования системы навигации судов заключается в следующем [13, 14]:

Суда оснащаются судовой аппаратурой 2, включающей в себя подсистему идентификации и определения местоположения судна 4 и судовую подсистему передачи данных 5.

При оснащении судов подсистемой идентификации и определения местоположения судна 4 должны быть учтены следующие основные особенности:

излучателей виброакустических сигналов судна 6 должно быть не менее четырех штук;

излучатели виброакустических сигналов судна 6 должны быть закреплены на судне так, чтобы они могли обозначать габариты судна и направление излучения от нах было в сторону дна акватории;

излучателей виброакустических сигналов судна 6 должны излучать в разных диапазонах частот.

По дну акватории прокладываются M волоконно-оптических кабелей (ВОК) 1, каждый из которых эквивалентен K_n приемникам виброакустических сигналов, подключённых к устройствам регистрации виброакустических воздействий 9, которое входит в состав подсистемы контроля и управления судоходством акватории 3, включающей также подсистему передачи данных 10, распределенную базу данных 11, устройство управления навигацией судов 12 и устройство отображения навигационной обстановки акватории 13.

Суда, идя по акватории, посредством излучателей виброакустических сигналов судна 6 воздействуют на ВОК 1 виброакустическими сигналами с идентификационными признаками, задаваемые устройством управления 7, переданными по средствам СППД 5. Данные воздействия регистрируются устройством регистрации виброакустических воздействий блок 9 и оцениваются устройством управления навигацией судов 12 в подсистеме контроля и управления судоходством акватории 3.

Устройство регистрации виброакустических воздействий 9 программно разбивает каждый из M ВОК 1 на N_m точек измерения [9 - 14], при этом каждая из N_m точек измерения выступает отдельным приёмником виброакустических воздействий, а количество гидроакустических приемников является совокупностью N_m точек измерения:

$$K = \sum_{m=1}^{M} N_m \cdot$$

Под измерительной точкой понимается участок ВОК $1_{m\,n}$, необходимый для осуществления измерения точки мониторинга (фиг.1). При необходимости, измерительные точки (участки ВОК) $1_{m\,n}$ могут уменьшаться с целью повышения точности определения координат вибрационных воздействий.

Устройства регистрации виброакустических воздействий 9 регистрируют спектрограммы B_{Ci} индивидуальных виброакустических характеристик судов, определяют координаты места воздействия излучателями виброакустических сигналов судна 6 на ВОК 1. Спектрограммы B_{Ci} индивидуальных виброакустических характеристик судов регистрируют посредством измерительных устройств, которые могут быть построены на основе когерентных рефлектометров [10, 11].

Устройство регистрации виброакустических воздействий 9 по средствам ППД 10 производит передачу результатов измерений в виде исходных данных на устройство управления навигацией судов 12, где производится обработка полученных исходных данных, оценка результатов регистрации воздействующих гидроакустических сигналов методом сравнения с имеющимися эталонами (шаблонами) спектрограмм индивидуальных виброакустических характеристик судов, хранящимися в распределенной база данных 11, обращаясь к ней по средствам подсистемы передачи данных 10.

Устройство управления навигацией судов 12, при выявлении соответствия полученной спектрограммы B_{Ci} с заданным спектральным шаблоном $\{B_{Ci}\}$, хранящимися в распределенной базе данных 11, производит идентификацию судна по индивидуальным виброакустическим характеристикам B_{Ci}, вычисление навигационных характеристик идентифицированного судна, формирование навигационной обстановки в акватории, выдачу по средствам ППД 10 навигационный обстановки на устройство отображения навигационной обстановки акватории 13, формирует и передает по средствам подсистемы передачи данных 10 и судовой подсистемы передачи данных 5 на устройство управления 7 судовой аппаратуры 2 необходимые для безопасной навигации судна исходные данные в виде формализованных сообщений об идентификационных признаках, габаритных характеристиках судна и координатах воздействия излучателей виброакустических сигналов судна 6.

Устройство управления навигацией судов 12 определяет и передает исходные данные на суда, взаимное местоположение которых влияет на безопасность судоходства в данной акватории.

Устройство отображения навигационной обстановки акватории 13 отображает координаты и результаты расчетов навигационных параметров, а также необходимые характеристики каждого судна, полученные от устройства управления навигацией судов 12, на графической модели акватории.

Устройство управления 7 сравнивает полученные идентификационные признаки судна со своими и в случае совпадения выводит посредством СППД 5 на графической модели устройства отображения 8 свое местоположение в акватории в соответствии с координатами, полученными от подсистемы контроля и управления судоходством акватории 3. При несовпадении полученных идентификационных признаков судна со своими на графической модели устройства отображения 8 указывается новое судно с его позывными в соответствии с исходными данными, полученными от подсистемы контроля и управления судоходством акватории 3.

Устройство управления 7 по регулярно получаемым исходным данным от устройства устройство управления навигацией судов 12 вычисляет навигационные параметры каждого судна (направление движения, скорости и др.). Навигационные параметра судов рассчитываются в соответствии с известными алгоритмами, применяемыми в навигационных системах.

Устройство отображения 8 отображает координаты и результаты расчетов навигационных параметров, а также необходимые характеристики каждого судна, полученные от подсистемы контроля и управления судоходством акватории 3 на графической модели акватории.

Мониторинг судоходной акватории осуществляют на протяжении всего времени судоходства, а в другие периоды оптоволоконные кабели могут быть использованы как элемент информационно-телекоммуникационной сети.

Заключение

1.За счёт применения, пространственно-распределённых преобразователей гидроакустических воздействий на основе оптического волокна с возможностью приёма вибрационных воздействий в плоскости закладки волоконно-оптического кабеля от N измерительных точек в совокупности с устройством регистрации виброакустических воздействий и других подсистем системы навигации судов, достигается повышение точности и достоверности определения координат и направления движения каждого судна, а также возможность определения скорости движения судов при их навигации в различных условиях и обстановке, создание пополняемой базы данных индивидуальных идентификационных признаков судов, осуществление их идентификации.

2.Предлагаемая система навигации может быть увязана с другими существующими системами.

3.Предлагаема система навигации может быть применена для решения дополнительных задачи, например, определения состояния акватории (шторм, ледоход и др.), выполнения телекоммуникационных функций и т.д.

Список литературы

1. Скосырев В.Н., Усачев В.А., Голов Н.А. О возможности создания высокоэффективного информационного обеспечения судовождения в арктической зоне РФ на основе современных радиолокационных и радионавигационных технологий // Морские информационно-управляющие системы. 2020. № 2 (18). С. 8 – 19.

2. Матвеев А. А., Кузнецов В. Н., В. Д. Гаскаров. Обзор технических средств и методов спутниковой навигации судов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2016. №1 (35). С. 207 – 214.

3. Ныркov А. П. Навигационные системы ГЛОНАСС/DGPS в обеспечении безопасности судоходства / А. П. Ныркov, Г. Б. Чистяков // Материалы междунар. науч.-практич. конф., посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление». 1–2 октября 2009 г. СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2009. С. 89–92.

4. Mamunts D. G. Using information technologies in dredging / D. G. Mamunts, S. S. Sokolov, A. P. Nyrkov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2015 — Vol. 91. — Pp. 012064.

5. Шахнович И. МЭМС-гироскопы – единство выбора // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 1. С. 76 – 85.

6. Голощапов А. Применение МЭМС-технологии в навигации // Компоненты и технологии. 2014. № 4. С. 65-69.

7. Бикмаев Р.Р. Особенности применения многочастичного фильтра в алгоритмах навигации подвижного наземного объекта с интегрированной системой технического зрения // Электронные информационные системы 2020. № 2 (25). С. 69–78.

8. Бабуров В.И., Гальперин Т.Б., Рогова А.А., Саута О.И. Тенденции способов комплексирования в системах навигации и посадки // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 05. Том 19. С. 34 – 44.

9. Патент 2620569 Российская Федерация, МПК G10L 15/00 (2013.01), H04R 29/00 (2006.01). Способ измерения разборчивости речи /Иванов Н.А., Иванов С.А., Краснов В.А., Стародубцев П.Ю., Стародубцев Ю.И., Сухорукова Е.В.; заявитель и патентообладатель Иванов Н.А., Стародубцев П.Ю. – 2016119183; заявл. 17.05.2016; опубл 26.05.2017. бюл. №15 – 12 с.

10. Патент 2690027 Российская Федерация, H04R 29/00 (2006.01). Способ одновременного измерения разборчивости речи нескольких источников / Иванов Н.А., Вергелис Н.И., Мещанин В.Ю., Иванов С.А., Стародубцев П.Ю., Стародубцев Ю.И., Вершенник Е.В. 2018121601; заявл. 14.06.2018 ; опубл 30.05.2019. бюлл. № 16 – 14.

11. Патент 2715176 Российская Федерация, G10L 15/00 (2013.01), H04B 10/25 (2013.01), G01R 29/08 (2006.01). Устройство оценки акустической обстановки обследуемого объекта / Иванов Н.А., Вергелис Н.И., Мещанин В.Ю., Иванов С.А., Стародубцев П.Ю., Стародубцев Ю.И., Вершенник Е.В. – 2019110378; заявл. 09.04.2019 ; опубл 25.02.2020. бюлл. № 6 – 16 с.

12. Патент 2755402 Российская Федерация, МПК G01S 15/42 (2006.01). Способ определения местоположения судов / Иванов Н.А., Попов В.В., Попов Р.В., Иванов С.А., Стародубцев Ю.И., Вершенник Е.В., Сабуров О.В. – 2021104763; заявл. 25.02.2020 ; опубл 15.09.2021. бюлл. № 26 – 14 с.

13. Патент 2746669 Российская Федерация, МПК G01M 7/02 (2006.01). Способ своевременного определения места и типа воздействия на вибронагруженный объект / Стародубцев Ю.И., Ива-нов Н.А., Иванов С.А., Вершенник Е.В., Смирнов И.Ю., Манаков К.О., Сабуров О.В. – 2020129939; заявл. 11.09.2020 ; опубл 19.04.2021. бюлл. № 11 – 13 с.

14. Патент 2795999 Российская Федерация, МПК G01S 15/42 (2006.01). Система навигации судов / Иванов Н.А., Попов В.В,, Попов Р.В., Иванов С.А., Стародубцев Ю.И., Вершенник Е.В., Сабуров О.В. – 2022105030; заявл. 25.02.2022; опубл 16.05.2023. Бюлл. № 14 – 15.

Стародубцев Юрий Иванович, д-р воен. наук, профессор, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Буденного,

Самохин Василий Федорович, д-р пед. наук, профессор, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Буденного,

Иванов Николай Александрович, канд. техн. наук, начальник отдела, sa- nic_iv@mail.ru, Россия, Москва, 16 Центральный научно-исследовательский испытательный институт,

Митрофанов Михаил Валерьевич, канд. тех. наук, начальник кафедры, vonafortim@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Буденного,

Вершенник Алексей Васильевич, канд техн. наук, преподаватель, alex14121972@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Буденного

APPLICATION OF TELECOMMUNICATION INFRASTRUCTURE OF OPTICAL CABLES TO DETERMINE THE LOCATION OF MOBILE OBJECTS

Ju.I. Starodubtsev, N.A. Ivanov, V.F. Samokhin, M.V. Mitrofanov, A.V. Vershennik

The article presents a variant of application of telecommunication infrastructure based on fiber-optic cables for navigation of mobile objects, namely, for identification of vessels and navigation management in the water area. A system for determining the location of vessels is proposed, which allows for the registration of vibroacoustic impacts for further identification of objects of impact by their individual vibroacoustic characteristics through the use of a spatially distributed acoustic impact transducer based on an optical fiber, which is used as hydroacoustic impact sensors.

Key words: navigation, identification, location determination, navigation management in the water area, fiber-optic cable.

Starodubtsev Jurij Ivanivich, doctor of military sciences, professor, Russia, St. Petersburg, S.M.Budyonny Military Academy of Communications,

Ivanov Nikolay Aleksandrovich, candidate of technical sciences, head of department, nic_iv@mail.ru, Russia, Moscow, 16 Central Research Testing Institute,

Samokhin Vasily Fedorovich, doctor of pedagogical sciences, professor, Russia, St. Petersburg, S.M. Budyonny Military Academy of Communications,

Mitrofanov Mikhail Valeryevich, candidate of technical sciences, head of the department, vonafortim@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, S.M. Budyonny Military Academy of Communications,

Vershennik Alexey Vasilyevich, candidate of technical sciences, teacher, alex14121972@mail.ru, Russia, St. Petersburg, S.M.Budyonny Military Academy of Communications

УДК 519.718
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-8-9

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А.М. Сухов, А.В. Крупенин, Е.А. Ленц, Д.Д. Праслов

Рассмотрено современное состояние проблемы обеспечения требуемого уровня информационной безопасности единого информационного пространства. Приведены основные причины возникновения уязвимостей в едином информационном пространстве. Раскрыты функции подключения к системе управления. Определена актуальная задача, заключающаяся в разработке формализованной модели процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности и методик на ее основе с целью модернизации системы и рациональной организации ее процесса функционирования с учетом информационного конфликта.

Ключевые слова: эффективность, процесс функционирования, упреждение, система обеспечения информационной безопасности.

Современные информационно-телекоммуникационные сети и системы (ИТКСиС) входящие в состав единого информационного пространства (ЕИП) представляют собой сложные территориально распределенные системы, что само по себе ставит перед системой обеспечения информационной безопасности (СОИБ) трудные задачи [1-8]. Кроме того, специфика функционирования ИТКСиС подразумевает совместное использование информационно-технических ресурсов, эксплуатация которых может привести к реализации деструктивных воздействий (ДВ) на критически важный объект, функционирующий в ЕИП, т.е. к нарушению целостности, конфиденциальности и/или доступности информации, а также функциональному поражению объекта [9-14].

Появление новых технологий приводит не только к совершенствованию процессов доступа к информации, но и к практически ежедневному появлению новых уязвимостей и разработке ДВ эксплуатирующих выявленные уязвимости [15-17]. Злоумышленник совершенствует технологии, и информация, способная оказать помощь в его деятельности, становится более доступной [18-20]. Доступность в сетях общего пользования программных средств для эксплуатации тех или иных уязвимостей программно-аппаратных средств позволяют совершать атакующие действия без наличия специальной подготовки и, как следствие, без точного представления о размерах ущерба, который может быть нанесен [20].

Существующие в ЕИП аппаратные и программные средства защиты информации (СрЗИ) позволяют осуществлять идентификацию и аутентификацию пользователей, контролировать физический и логический доступ, производить аудит атомарных событий информационной безопасности (АСИБ) и осуществлять криптографическую защиту [5, 9, 11, 15]. Однако обеспечение абсолютной защиты в любое время всех компонент и сервисов системы невозможно, в первую очередь - с экономической точки зрения [2, 4, 6].

Кроме того, достаточно сложно реализовать эффективное применение механизмов контроля доступа в условиях использования ресурсов сетей общего пользования для предоставления доступа к конфиденциальной информации, когда различие между внутренним и внешним пользователем неочевидно. Таким образом, внешний периметр ЕИП, вследствие динамического изменения конфигурации сети и увеличения числа точек внешнего доступа к службам и информационным ресурсам, становится все более незащищенным.

Межсетевые экраны (МЭ), являющиеся важнейшими элементами СОИБ, могут контролировать доступ к ресурсам и службам из-за пределов внешнего периметра и выявлять определенные события, связанные с попытками незаконного проникновения в различные сегменты сети передачи данных. Однако при помощи МЭ невозможно и экономически нецелесообразно защититься от всех возможных ДВ. Следовательно, СОИБ необходимы средства, осуществляющие обнаружение ДВ и выработку соответствующей реакции системы защиты. В этом и заключаются основные функции СОИБ.

В области систем обнаружения вторжений также существует разграничение между понятиями вторжение («intrusion») и атака («attack»), где под вторжением понимается факт успешной атаки, т.е. атака, которая частично или полностью реализовалась в защищаемой системе.

Целью применения СОИБ является выявление определенных событий, возникающих в процессе функционирования ЕИП и несоответствующих принятой политике безопасности. Основными причинами возникновения уязвимостей в ЕИП являются: ошибки конфигурирования системы, ошибки при разработке программного обеспечения, неосторожность (ошибки) пользователей, ошибки проектирования протоколов взаимодействия и ошибки разработки операционных систем и другие. Несмотря на то, что, находясь за пределами внешнего периметра ЕИП, часто используются выявленные уязвимости, следует учитывать, что наибольший ущерб, как правило, возникает при эксплуатации уязвимостей доверенными пользователями системы, так как авторизованные пользователи могут воспользоваться своими правами и привилегиями, знаниями особенностей всей СОИБ, физическим доступом к компонентам и т. д.

Подобно другим компонентам СОИБ, наличие любой подсистемы должно быть обосновано анализом рисков безопасности информации. Предлагаемая СОИБ должна интегрироваться в общую структуру для обеспечения требуемого уровня защищенности объектов ЕИП [4, 6]. СОИБ, выполняя роль по упреждению сценариев ДВ

различного рода, должна увеличивать вероятность обнаружения как АСИБ, так и сценарии в целом, эффективно удерживать рубежи обороны ЕИП и реализовываться на директивном интервале времени упреждения ДВ. В СОИБ должны быть реализованы функции подключения к системе управления, реализующие:

– получение отчетов об АСИБ, включая события, которые необходимы для генерации сценариев упреждающего поведения;

– проведение анализа АСИБ;

– содействие восстановлению функций ЕИП (при нарушении работоспособного состояния);

– формирование базы знаний сценариев упреждающего поведения, так и сценариев деструктивных воздействий.

В СОИБ в целях улучшения качества поддержки принятия решения при анализе рисков безопасности информации должен присутствовать механизм обновления в базах знаний сведений об актуальных угрозах безопасности информации и уязвимостях ЕИП [20].

Одним из перспективных направлений в реализации функции упреждения, повышающей безопасность функционирования ЕИП, является построение возможных сценариев упреждающего поведения, в зависимости от значения интервала времени на котором реализуются ДВ различного рода. Его назначение – поиск еще неизвестных интервалов времени реализации ДВ.

Одной из основных проблем в создании СОИБ, основанной на реализации описанной выше функции, является отсутствие информации как о самих сценариях ДВ, так и о возможных значениях временных интервалов времени их реализации, что не позволяет в полной мере сделать объективную оценку состояния защищенности ЕИП в заданный момент времени t. Также существует необходимость количественного оценивания уровня опасности реализуемого сценария ДВ. Результат оценивания должен характеризовать причину изменений интервала $[t_H, t_K]$ времени доступа и число АСИБ входящих в сценарий ДВ. Утверждать, что реализуемое АСИБ попадает в интервал времени доступа, можно только в том случае, если причиной этого, является заданный уровень гарантии.

Разработанные к настоящему времени методики основываются на субъективной экспертной оценке, которая не вполне адекватна изменяющейся среде функционирования ЕИП. Суть этих методик заключается в определении порога допустимых изменений, его превышение рассматривается как отсутствие сценария, который попадает на интервал времени гарантированного доступа к ЕИП. Очевидно, что завышение порога приводит к обнаружению следов реализации сценария ДВ, а занижение - к его пропуску вовсе. Наибольший практический интерес при решении задачи оценивания значения интервала $[t_H, t_K]$ времени реализации представляют методики позволяющие получать количественные показатели [21-23].

Необходимо подчеркнуть, что таких методик и основанных на них СОИБ в настоящее время не существует.

В этой связи необходимо отметить, что разработка научно-методического аппарата количественного оценивания интервалов $[t_H, t_K]$ времени реализации ДВ, так и упреждающего поведения тесно связана с решением целого рядя теоретических и практических задач, удовлетворительного решения которых до настоящего времени не получено.

Следовательно, актуальной задачей является разработка формализованной модели процесса функционирования СОИБ и методик на ее основе с целью совершенствования (модернизации) СОИБ и рациональной организации ее процесса функционирования. Это в дальнейшем позволит разработать принципиально новую СОИБ ЕИП.

Список литературы

1. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Методы анализа и синтеза исследования эффективности процессов функционирования системы обнаружения предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак // Автоматизация процессов управления. 2021. № 4 (66). С. 4–14.

2. Устройство для решения задачи оценки экономической эффективности унификации сложной технической системы на этапе проектирования / Н.И. Филатов, Е.С. Иващенко, А.Н. Гнутиков, С.А. Батюшков и др. // Патент на полезную модель № 90231.

3. Сухов А.М. Подход к упреждению комплексных компьютерных атак в автоматизированной системе специального назначения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2017. № 658. С. 62–77.

4. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Методы построения математических моделей показателей качества результатов процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 1 (49). С. 110-120.

5. Samoylenko D., Eremeev M., Finko O., Dichenko S. Protection of information from imitation on the basis of crypt-code structures // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Т. 889. С. 317–331.

6. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Метод вычисления показателя эффективности процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности // Автоматизация процессов управления. 2022. № 1 (67). С. 33–42.

7. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М. : АСТ, 2006. 504 с.

8. Сухов А.М. Оценивание эффективности процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности на основе теории стохастической индикации // Информационно-управляющие системы. 2022. № 3 (118). С. 31–44.

9. Dichenko S.A. An integrity control model for multidimensional data arrays // Automatic Control and Computer Sciences. 2021. Т. 55. № 8. С. 1188–1193.

10. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Метод моделирования процесса функционирования автоматизированной системы специального назначения в условиях деструктивных воздействий // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 2 (50). С. 106-124.

11. Finko O., Samoylenko D., Dichenko S., Eliseev N. Parallel generator of q-valued pseudorandom sequences based on arithmetic polynomials // Przeglad Elektrotechniczny. 2015. Т. 91. № 3. С. 24–27.

12. Сухов А.М., Горбачев И.Е., Якунин В.И. Методика моделирования процесса функционирования системы обнаружения вторжений в компьютерную сеть в задачах исследования эффективности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2017. № 2. С. 23-30.

13. Юсупов Р.М., Мусаев А.А. Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 1(51). С. 5–34.

14. Математическая модель процесса функционирования подсистемы реагирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак / А.М. Сухов, С.Ю. Герасимов, М.А. Еремеев, В.И. Якунин // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 2. С. 56–64.

15. Dichenko S.A., Finko O.A. Controlling and restoring the integrity of multi-dimensional data arrays through cryptocode constructs // Programming and Computer Software. 2021. Т. 47. № 6. С. 415-425.

16. Сухов А.М., Ступин Д.Д., Ломако А.Г. Модель проактивного обнаружения компьютерных атак // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XX Междунар. конф. / под редакцией Е.А. Федосова, Н.А. Кузнецова, С.Ю. Боровика. Самара: Изд-во «Офорт», 2018. С. 509–512.

17. Пономарев Ю.А., Лукьянов Р.В., Сухов А.М. Таксономия моделей нарушителей на основе анализа руководящих документов в области информационной безопасности // Защита информации. Инсайд. 2016. № 2 (68). С. 69-71.

18. Петренко С.А. Методы информационно-технического воздействия на киберсистемы и возможные способы противодействия // Труды ИСА РАН. 2009. Т. 41. С. 104-146.

19. Глыбовский П.А., Новиков С.В., Сухов А.М. Метод прогнозирования состояния защищенности информационных систем // Труды XX Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Под редакцией Е. А. Федосова [и др.]. Самара: Изд-во «Офорт». 2018. С. 461-466.

20. Диченко С.А. Модель угроз безопасности информации защищенных информационно-аналитических систем специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 1-2 (163-164). С. 64-71.

21. Стародубцев Ю.И., Бегаев А.Н., Давлятова М.А. Управление качеством информационных услуг. СПб.: Издательство Политехнического университета. 2017. 454 с.

22. Петров В.А., Медведев Г.И. Системная оценка эффективности новой техники. Л.: Машиностроение. 1978. 256 с.

23. Основы исследования операций в военной технике. /Под ред. Ю.В. Чуева. М.: Сов. радио, 1965. 591 с.

Сухов Александр Максимович, канд. техн. наук, сотрудник, 19am87@mail.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище имени С.М. Штеменко,

Крупенин Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор, сотрудник, 19sam87@mail.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище имени С.М. Штеменко,

Ленц Евгений Альбертович, сотрудник, 19am87@mail.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище имени С.М. Штеменко,

Праслов Даниил Дмитриевич, сотрудник, 19am87@mail.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище имени С.М. Штеменко

JUSTIFICATION OF THE NEED TO CONDUCT RESEARCH ON THE INFORMATION SECURITY SYSTEM

A.M. Sukhov, A.V. Krupenin, E.A. Lenz, D.D. Praslov

The current state of the problem of ensuring the required level of information security of the unified information space is considered. The main reasons for the occurrence of vulnerabilities in a single information space are given. The functions of connection to the control system are disclosed. The actual task is defined, which consists in the development of a formalized model of the functioning of the information security system and methods based on it in order to modernize the system and rationally organize its functioning process taking into account the information conflict.

Key words: efficiency, functioning process, pre-emption, information security system.

Aleksandr Maksimovich Sukhov, candidate of technical sciences, employee, 19am87@mail.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko,

Aleksandr Vladimirovich Krypenin, doctor of technical sciences, professor, employee, 19sam87@mail.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko,

Evgeny Albertovich Lenz, employee, 19am87@mail.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko,

Daniil Dmitrievich Praslov, employee, 19am87@mail.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko

УДК № 519.718
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-3-4

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОВОДИМОЙ СИСТЕМОЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПЕРАЦИИ

А.М. Сухов

Рассмотрены аспекты классификации показателей качества и эффективности целенаправленного процесса функционирования системы и критериев их оценивания. Классифицированы показатели результативности целенаправленного процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности.

Ключевые слова: эффективность, классификация, показатель, критерий, система обеспечения информационной безопасности.

В работах [1-12] достаточно полно рассмотрена проблема исследования качества целенаправленного процесса функционирования (ЦнПФ) системы обеспечения информационной безопасности (СОИБ) (точнее, качества результатов ЦнПФ системы и ее эффективности), т.е. ее математическая формулировка и принципы, лежащие в основе методов ее решения. Поскольку в данной статье объектом исследования является ЦнПФ СОИБ (операция), то реализующая его система рассматривается лишь как элемент операционной системы и операционного комплекса, так как в рамках исследования операций структура, параметры и эксплуатационно-технические характеристики (ЭТХ) СОИБ считаются заданными или варьируемыми (кроме структуры) в ограниченных пределах [1, 3, 6, 8, 13-16].

Качество любого объекта в полной мере проявляется лишь в процессе его использования по назначению [1, 4, 8, 10, 17]. Поэтому наиболее информативным и объективным является оценивание качества СОИБ по эффективности ее целевого применения. Для такого оценивания система должна быть подвергнута опытной эксплуатации (испытаниям), в ходе которой и выявляется ее качество [2, 3, 5, 9, 18-20]. Однако, с одной стороны, далеко не все СОИБ могут быть испытаны в условиях, достаточно близких к тем, в которых им придется функционировать по назначению, с другой – наибольший практический интерес представляет априорная оценка качества систем, т.е. еще до их применения [3, 5, 21-23]. Так, для управления качеством процесса (например, обнаружения деструктивных воздействий злоумышленника) его необходимо оценивать на этапе производства и даже еще раньше – на стадии разработки опытных образцов СОИБ [17, 18, 24].

Это же относится и к СОИБ, прогноз качества которой необходим на этапах её проектирования и разработки, а оценка качества – на этапе приемных испытаний, предшествующем ее применению в реальных условиях. Для проведения оценивания необходимы показатели качества и эффективности ЦнПФ системы (ЦнПФС), и критерии их оценивания. Аспекты классификации показателей качества и эффективности ЦнПФ СОИБ и критериев их оценивания приведены на рис. 1.

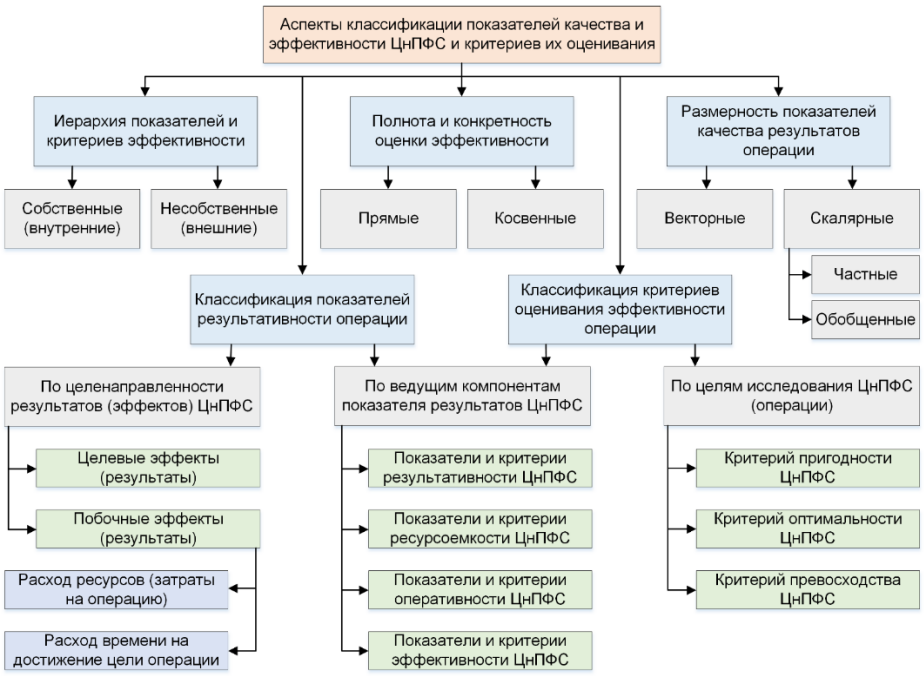


Рис. 1. Аспекты классификации показателей качества и эффективности ЦнПФ системы и критериев их оценивания

Априорное оценивание качества СОИБ без прямого ее применения по назначению возможно, если известно соотношение, связывающее его характеристики (структуру, организацию, параметры, ЭТХ и т.п.) с выходными эффектами его целевого применения (функционирования по назначению) [1, 4, 6, 10, 12].

Итак, пусть объект исследования СОИБ и пусть $\mathbf{Y}_{\langle n\rangle}$ – вектор выходных эффектов ЦнПФС (показатель виртуального качества его результатов), $\mathbf{A}'_{\langle k'\rangle}$ – вектор виртуальных значений параметров и ЭТХ СОИБ (структурных, организационных, эксплуатационных, технических, параметрических и т.п.), $\mathbf{A}''_{\langle k''\rangle}$ – вектор виртуальных значений характеристик организации ЦнПФ СОИБ, $\mathbf{B}'_{\langle l'\rangle}$ – вектор характеристик условий функционирования СОИБ. Кроме того, пусть известно соотношение:

$$\mathbf{Y}_{\langle n\rangle} = \mathbf{Y}_{\langle n\rangle}\left(\mathbf{A'}_{\langle k'\rangle}; \mathbf{A''}_{\langle k''\rangle}, \mathbf{B'}_{\langle l'\rangle} \right), \tag{1}$$

устанавливающее зависимость выходных эффектов (результатов) ЦнПФ СОИБ от параметров, ЭТХ и условий функционирования системы и характеристик процесса. Тогда, если через $\left\{ \mathbf{Y}^{\text{д}}_{\langle n\rangle} \right\}$ обозначить область допустимых значений $\mathbf{Y}^{\text{д}}_{\langle n\rangle}$ вектора $\mathbf{Y}_{\langle n\rangle}$, т.е. таких, при которых СОИБ выполняет свои задачи, то критерий пригодности системы для целевого применения (критерий целевой пригодности) будет иметь следующее выражение:

$$G_{\text{ЦР}} : \mathbf{Y}_{\langle n\rangle} \in \left\{ \mathbf{Y}^{\text{д}}_{\langle n\rangle} \right\} \cong U. \tag{2}$$

Если для оператора (2) существует обратный оператор по вектору $\mathbf{A}'_{\langle k'\rangle}$:

$$\mathbf{A'}_{\langle k'\rangle} = \mathbf{A'}_{\langle k'\rangle}\left(\mathbf{Y}_{\langle n\rangle}; \mathbf{A''}_{\langle k''\rangle}, \mathbf{B'}_{\langle l'\rangle} \right) = \mathbf{Y}^{-1}_{\langle k'\rangle}\left(\mathbf{Y}_{\langle n\rangle}; \mathbf{A''}_{\langle k''\rangle}, \mathbf{B'}_{\langle l'\rangle} \right), \tag{3}$$

позволяющий выразить зависимость виртуальных «значений» параметров и ЭТХ СОИБ от выходных эффектов, характеристик ее ЦнПФ и условий функционирования СОИБ, то может быть определена область $\left\{ \mathbf{A}'^{\text{д}}_{\langle k'\rangle} \right\}$ допустимых значений $\mathbf{A}'^{\text{д}}_{\langle k'\rangle}$ вектора $\mathbf{A}'_{\langle k'\rangle}$ параметров и ЭТХ СОИБ, при которых она может выполнить свои функции, соответствующая области $\left\{ \mathbf{Y}^{\text{д}}_{\langle n\rangle} \right\}$ допустимых значений $\mathbf{Y}^{\text{д}}_{\langle n\rangle}$ результатов $\mathbf{Y}_{\langle n\rangle}$ ЦнПФ СОИБ, т.е.

$$\left\{ \mathbf{Y}^{\text{д}}_{\langle n\rangle} \right\} \Rightarrow \left\{ \mathbf{A}'^{\text{д}}_{\langle k'\rangle} \right\} = \left\{ \mathbf{A}'^{\text{д}}_{\langle k'\rangle} : \mathbf{Y}_{\langle n\rangle}\left(\mathbf{A}'^{\text{д}}_{\langle k'\rangle}; \mathbf{A}''^{\text{Н}}_{\langle k''\rangle}, \mathbf{B}'^{\text{Н}}_{\langle l'\rangle} \right) = \mathbf{Y}^{\text{д}}_{\langle n\rangle} \right\}, \tag{4}$$

где $\mathbf{A}''^{\text{Н}}_{\langle k''\rangle}$ – номинальные (расчетные) значения характеристик ЦнПФ СОИБ, $\mathbf{B}'^{\text{Н}}_{\langle l'\rangle}$ – номинальные (расчетные) значения характеристик условий функционирования СОИБ, создаваемых в ходе приемных испытаний.

Тогда критерий параметрической пригодности СОИБ будет иметь вид

$$G_{\text{ЦП}} : \mathbf{A}'_{\langle k'\rangle} \in \left\{ \mathbf{A}'^{\text{д}}_{\langle k'\rangle} \right\} \cong U. \tag{5}$$

Таким образом, для контроля, проверки и приемки СОИБ реализуется критерий (5), позволяющий управлять ее качеством, не подвергая целевому применению.

Понятно, что в пределах области $\left\{ \mathbf{A}'^{\text{д}}_{\langle k'\rangle} \right\}$ качества СОИБ, удовлетворяющих критерию (5), различны, однако в его (критерия) рамках оно (качество СОИБ) считается одинаковым.

В принципе в выражениях (2) и (5) области $\left\{ \mathbf{Y}^{\text{д}}_{\langle n\rangle} \right\}$ и $\left\{ \mathbf{A}'^{\text{д}}_{\langle k'\rangle} \right\}$ могут иметь размерности меньшие, чем соответственно *n* и k', и даже могут быть точками, что определяется классом *K* руководящего («выбранного») критерия, координаты которых определяют оптимальные или превосходные значения выходных эффектов $\mathbf{Y}_{\langle n\rangle}$ и соответствующих им параметров $\mathbf{A}'_{\langle k'\rangle}$ СОИБ.

На практике допустимые значения $\mathbf{A}'^{\text{д}}_{\langle k'\rangle}$ параметров $\mathbf{A}'_{\langle k'\rangle}$ определяются, как правило, экспериментально с проведением испытаний СОИБ (стендовых, виртуальных и т.п.).

Наряду с приведенной на рис. 2 классификацией применяемых показателей эффективности операций и критериев ее оценивания целесообразно рассмотреть и классификацию показателей результативности ЦнПФ СОИБ, отражающую специфику широкого и весьма универсального класса целенаправленных процессов, а именно процессов массового обслуживания (ПМО), при оценивании эффективности которых применяются специфические показатели их результатов (целевых и побочных эффектов). Схема классификации таких показателей по пяти основным аспектам показана на рис. 2.

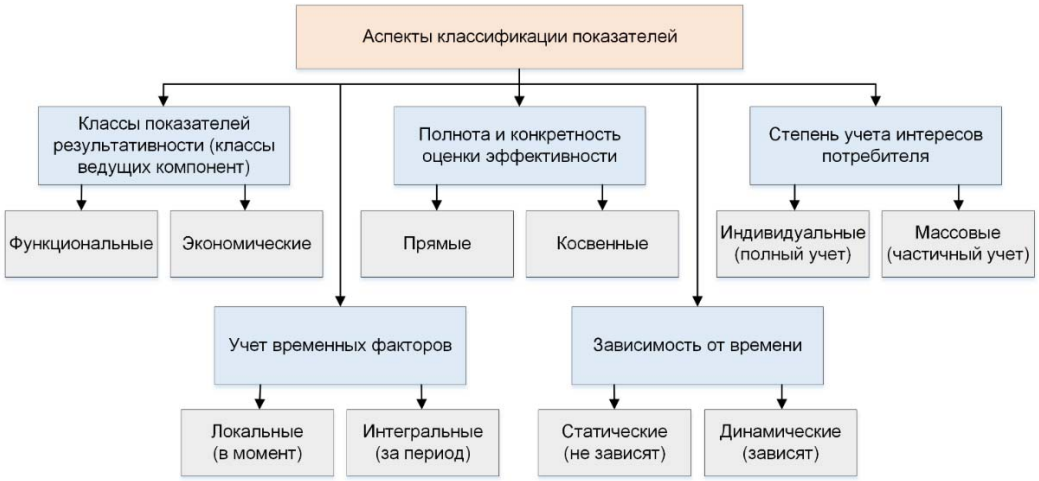


Рис. 2. Классификация показателей результативности ЦнПФ СОИБ

Кратко рассмотрим принципы этой классификации.

1. Прежде всего, следует различать функциональную (целевую) и экономическую (ресурсную) компоненты вектора результатов ЦнПФ СОИБ. Под «функциональной эффективностью» понимается приспособленность исследуемого объекта – СОИБ (правильнее, процесса его целевого функционирования – ЦнПФ СОИБ) к выполнению возложенных на него функций (поставленной перед ним задачи – цели). Это свойство называется результативностью (или действительностью) ЦнП, реализуемого объектом (СОИБ). В то же время «экономическая эффективность» отражает либо такие свойства ЦнПФС, как доходность, рентабельность и т.д. (для народнохозяйственных операционных комплексов (ОпК)), либо стоимостные показатели процессов проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации (боевого применения) таких комплексов [1, 4, 6, 8].

2. В рассматриваемой классификации термины «прямые и косвенные показатели» призваны отразить степень их информативности по отношению к задаче исследования. Так, прямые показатели непосредственно отвечают на вопросы: насколько результативен ЦнПФ СОИБ и насколько ОпК приспособлен к выполнению поставленных перед ним задач. Однако, к сожалению, не всегда удается четко сформулировать задачи ОпК, что, как правило, обусловлено наличием нескольких, подчас противоречивых задач. В таких случаях целесообразно использовать косвенные показатели результативности ЦнП, дающие исследователю представление о наиболее важных характеристиках ЦнПФ СОИБ. Окончательное суждение о его эффективности вырабатывается эвристически с учетом целого ряда не формализуемых дополнительных данных и сведений [1, 10].

3. По третьему аспекту показатели результативности ЦнП делятся на индивидуальные и групповые. Такая классификация в первую очередь относится к ПМО, протекающим в комплексах и системах массового обслуживания. При этом, если индивидуальные показатели в основном характеризуют «качество» процесса обслуживания отдельного (но произвольного) требования, то групповые показатели характеризуют (в среднем) «качество» процесса обслуживания всех поступающих в систему требований [1, 3, 6, 10].

4. По четвертому аспекту показатели делятся на локальные (точечные) и интегральные (интервальные), т.е. на показатели, определяющие результативность процесса соответственно в некоторый произвольный момент времени и за некоторый период (интервал) времени [1].

5. По признаку зависимости от времени следует различать статистические и динамические показатели результативности. Строго говоря, все показатели результативности ЦнПФ СОИБ зависят от времени, причем в выражения для локальных показателей эта переменная (время) входит непосредственно (как аргумент), а в интегральных показателях она определяет начальный момент периода функционирования СОИБ (начало ЦнПФ СОИБ) и играет роль параметра. Однако в установившемся, стационарном режиме работы СОИБ указанная зависимость исчезает, локальные показатели становятся постоянными (константами), а интегральные зависят только от длительности периода функционирования СОИБ и не зависят от его положения на временной оси [10].

Список литературы

1. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Методы анализа и синтеза исследования эффективности процессов функционирования системы обнаружения предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак // Автоматизация процессов управления. 2021. № 4 (66). С. 4–14.

2. Устройство для решения задачи оценки экономической эффективности унификации сложной технической системы на этапе проектирования / Н.И. Филатов, Е.С. Иващенко, А.Н. Гнутиков, С.А. Батюшков и др. // Патент на полезную модель № 90231.

3. Сухов А.М. Подход к упреждению комплексных компьютерных атак в автоматизированной системе специального назначения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2017. № 658. С. 62–77.

4. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Методы построения математических моделей показателей качества результатов процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 1 (49). С. 110-120.

5. Samoylenko D., Eremeev M., Finko O., Dichenko S. Protection of information from imitation on the basis of crypt-code structures // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Т. 889. С. 317–331.

6. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Метод вычисления показателя эффективности процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности // Автоматизация процессов управления. 2022. № 1 (67). С. 33–42.

7. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М. : АСТ, 2006. 504 с.

8. Сухов А.М. Оценивание эффективности процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности на основе теории стохастической индикации // Информационно-управляющие системы. 2022. № 3 (118). С. 31–44.

9. Dichenko S.A. An integrity control model for multidimensional data arrays // Automatic Control and Computer Sciences. 2021. Т. 55. № 8. С. 1188–1193.

10. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Метод моделирования процесса функционирования автоматизированной системы специального назначения в условиях деструктивных воздействий // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 2 (50). С. 106-124.

11. Finko O., Samoylenko D., Dichenko S., Eliseev N. Parallel generator of q-valued pseudorandom sequences based on arithmetic polynomials // Przeglad Elektrotechniczny. 2015. Т. 91. № 3. С. 24–27.

12. Сухов А.М., Горбачев И.Е., Якунин В.И. Методика моделирования процесса функционирования системы обнаружения вторжений в компьютерную сеть в задачах исследования эффективности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2017. № 2. С. 23-30.

13. Юсупов Р.М., Мусаев А.А. Особенности оценивания эффективности информационных систем и технологий // Труды СПИИРАН. 2017. Вып. 1(51). С. 5–34.

14. Математическая модель процесса функционирования подсистемы реагирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак / А.М. Сухов, С.Ю. Герасимов, М.А. Еремеев, В.И. Якунин // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 2. С. 56–64.

15. Dichenko S.A., Finko O.A. Controlling and restoring the integrity of multi-dimensional data arrays through cryptocode constructs // Programming and Computer Software. 2021. Т. 47. № 6. С. 415-425.

16. Сухов А.М., Ступин Д.Д., Ломако А.Г. Модель проактивного обнаружения компьютерных атак // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XX Междунар. конф. / под редакцией Е.А. Федосова, Н.А. Кузнецова, С.Ю. Боровика. Самара: Изд-во «Офорт», 2018. С. 509–512.

17. Пономарев Ю.А., Лукьянов Р.В., Сухов А.М. Таксономия моделей нарушителей на основе анализа руководящих документов в области информационной безопасности // Защита информации. Инсайд. 2016. № 2 (68). С. 69-71.

18. Петренко С.А. Методы информационно-технического воздействия на киберсистемы и возможные способы противодействия // Труды ИСА РАН. 2009. Т. 41. С. 104-146.

19. Глыбовский П.А., Новиков С.В., Сухов А.М. Метод прогнозирования состояния защищенности информационных систем // Труды XX Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Под редакцией Е. А. Федосова [и др.]. Самара: Изд-во «Офорт». 2018. С. 461-466.

20. Стародубцев Ю.И., Бегаев А.Н., Давлятова М.А. Управление качеством информационных услуг. СПб.: Издательство Политехнического университета. 2017. 454 с.

21. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Критерии применяемые для оценивания качества систем обеспечения информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2023. № 1 (53). С. 139-147.

22. Петров В.А., Медведев Г.И. Системная оценка эффективности новой техники. Л.: Машиностроение. 1978. 256 с.

23. Основы исследования операций в военной технике. /Под ред. Ю.В. Чуева. М.: Сов. радио, 1965. 591 с.

24. Диченко С.А. Модель угроз безопасности информации защищенных информационно-аналитических систем специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 1-2 (163-164). С. 64-71.

Сухов Александр Максимович, канд. техн. наук, сотрудник, 19am87@mail.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище имени С.М. Штеменко

CLASSIFICATION OF PERFORMANCE INDICATORS OF THE OPERATION CARRIED OUT BY THE INFORMATION SECURITY SYSTEM

A.M. Sukhov

The aspects of classification of quality indicators and efficiency of the purposeful process of functioning of the system and criteria for their evaluation are considered. The performance indicators of the purposeful process of functioning of the information security system are classified.

Key words: efficiency, classification, indicator, criterion, information security system.

Aleksandr Maksimovich Sukhov, candidate of technical sciences, employee, 19am87@mail.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko.

УДК 004.93
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-15-16

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ПОИСКА ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СИММЕТРИИ ДЛЯ БИНАРНЫХ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

О.С. Середин, Д.В. Ляхов, Н.А. Ломов

В работе предложено использовать машинное обучение по прецедентам на основе свёрточной нейронной сети для решения задачи оценивания меры отражательной симметрии на основе подобия Жаккра. Обучающая выборка представляет собой несколько тысяч бинаризованных изображений, мера симметрии на которых подсчитана на основе процедуры полного перебора возможных осей, пересекающих фигуру. Расширение базы выполнено случайными смещениями и фиксированными отражениями исходных изображений. Подобрана архитектура и параметры нейронной сети, обеспечивающие среднюю абсолютную ошибку на кросс-проверке равную около 0.042.

Ключевые слова: бинарное растровое изображение, отражательная симметрия, мера Жаккара, свёрточная нейронная сеть.

Введение. Симметрия — важное свойство визуальных объектов, часто используемое в компьютерном зрении и распознавании образов. Когда объект называют симметричным, считают, что существует не равное тождественному преобразование T, не изменяющее объект. Однако, так как в реальной жизни абсолютно симметричные объекты встречаются редко, уместнее говорить о мере симметрии объекта, принимающей значения из диапазона [0,1]. В таком случае объекты, мера которых в точности равна 1, будут абсолютно симметричными, а объекты с мерой, близкой к 1 — квазисимметричными.

В задаче автоматической оценки меры симметрии можно выделить две подзадачи: 1) математическая формализация меры симметрии, которая бы хорошо согласовывалась с интуитивным представлением человека о симметрии; 2) разработка эффективных алгоритмов для вычисления меры симметрии на основе заданной формализации и получение параметров преобразования исходной фигуры (например, отражения или вращения).

Мы будем рассматривать задачу оценки меры симметрии плоской фигуры A. В этом случае одной из общеупотребимых оценок меры симметрии является оценка на основе меры Жаккара:

$$J(A_\gamma) = \frac{\left|A \cap T_\gamma(A)\right|}{\left|A \cup T_\gamma(A)\right|},$$

где $T_\gamma(A)$ — преобразование из множества допустимых преобразований T, заданное набором параметров γ из соответствующего множества Γ. Требуется найти преобразование, обеспечивающее максимальное значение меры, которое и будет считаться итоговой мерой симметрии фигуры:

$$\hat{J}(A) = J(A_{\hat{\gamma}}), \hat{\gamma} = \arg\max_{\gamma \in \Gamma} J(A_\gamma).$$

Таким образом, ключевым пунктом постановки задачи является задание множества допустимых преобразований T и способа их параметризации.

2. Обзор существующих методов. Стоит отметить, что вопрос симметричности и проблема определения симметрии возникает в различных науках, ее осмыслению посвящено много научных статей. Интересным примером может быть работа [1] о симметричности и асимметрии человеческого тела, мозга и связанных с этим психических проявлениях.

В компьютерном зрении в качестве модели представления плоской фигуры может служить как граница фигуры (контур), так и внутренность фигуры, взятая вместе с границей. В работе [2] определение зеркальной симметрии фигур производится на основе параметрического представления контура. Предлагаются несколько вариантов периодического параметрического представления полигонального контура фигуры, сохраняющих информацию о форме. В качестве параметра используется так называемая нормированная длина дуги, т.е. нормированный на величину периметр контура. Далее параметрическое представление раскладывается в ряд Фурье, коэффициенты рядов Фурье разных контуров сравниваются между собой посредством вычисления расстояния между ними. На основе такого метода может вычисляться степень асимметрии фигуры (коэффициенты Фурье двух частей контура одной фигуры).

В статье [3] предложен способ определения зеркальной симметрии фигур на основе вычисления функции поворота контура. В основу положен метод сравнения полигональных фигур, изложенный в Arkin et al. [4], где контур фигуры, длина которого нормируется к единице, описывается при помощи функции поворота. Функция поворота является периодическим параметрическим описанием контура фигуры. Недостатком такого описания является его чувствительность к шумам на границе фигуры, поэтому перед сравнением фигур рекомендуется провести сглаживание их контуров. Приводится метрика различия для двух функций поворота, инвариантная к переносу, повороту и масштабированию фигур. На основе данной метрики определяется мера сходства фигур, при помощи которой можно определить меру симметричности фигуры как максимум меры сходства между ее контуром и тем же контуром, отраженным относительно некоторой прямой — оси симметрии.

В основу метода вычисления зеркальной симметрии, изложенного в [5], положен принцип определения самосходства частей контура фигуры на основе вычисления геодезических расстояний до главных точек. Контур фигуры представляется в виде набора нескольких главных точек (critical points), найденных при помощи метода вычисления дискретной кривой (Discrete Curve Evolution, DCE), описанного в [6]. Полученный контур делят на два примерно равных подконтура, один из которых рассматривают в порядке по часовой стрелке, второй — против. Для каждой главной точки вычисляют вектор геодезических (внутренних по фигуре) расстояний (идея взята в [7]) от нее до каждой из точек контура. Далее вычисляют матрицу расстояний между векторами, принадлежащими двум под-

контурам, и по матрице находят оптимальное выравнивание подконтуров и меру их различия. Для уточнения результата поиска наиболее похожих подконтуров всю процедуру проделывают несколько раз с разным количеством главных точек.

Внутреннее расстояние для нахождения оси симметрии также используется в работе [8], где на его основе рассчитывается распределение электрических зарядов на форме (Electrical Charge Distribution on the Shape — ECDS). Так как ECDS инвариантен к изометрическому преобразованию, то данный метод способен определять внешнюю и внутреннюю симметрию. Затем проблема обнаружения зеркальной симметрии в пространстве фигуры преобразуется в проблему обнаружения горизонтальных линий (т. е. строк со всеми нулями) в локальной матрице сходства, которая формируется из разницы между соответствующими электрическими зарядами фигуры относительно всех потенциальных осей симметрии. Горизонтальные линии различной длины в матрице сходства показывают глобальную и локальную симметрию частей исследуемой фигуры.

В работе [9] для определения симметрии вводятся инварианты отражения и определяются направленные моменты (Directional Moments — DM). Обнаружение симметрии отражения может быть сделано путем решения тригонометрической системы, полученной из DM, а также путем применения инвариантов отражения в 2D и 3D. Если ни один из инвариантов отражения не равен нулю, то симметрии нет. Проведенные в данной работе эксперименты в 2D и 3D показывают, что все линии или плоскости отражения могут быть детерминированно найдены с использованием DM до шестого порядка. Однако приведенные в работе инварианты отражения не применимы к реальным изображениям.

Известны разработанные методы определения параметров симметрии на основе преобразования Хафа — как для отражательной [10], в том числе при наличии скоса, так и для вращательной [11] симметрии. Среди недостатков данных методов можно выделить отсутствие явного количественного выражения меры симметрии, которое теоретически можно получить путём анализа аккумулятора Хафа. Также методы требуют ощутимых вычислительных затрат, к примеру, при поиске оси отражательной симметрии подход требует рассмотрения всех четверок точек границы, складывающихся в трапеции. В работе [12] был разработан метод определения параметров симметрии со скосом на основе invariant signatures — описания границы через кривизну и длину дуги, инвариантного к неевклидовым преобразованиям. Л.М. Местецкий и А.В. Журавская предложили метод [13] определения оси симметрии, основанный на преобразовании Фурье точек контура фигуры. Несомненным достоинством метода является его высокая вычислительная эффективность, однако практика показывает, что сам предложенный критерий не всегда служит адекватной оценкой меры симметрии, особенно при наличии шумовых участков границы большой длины.

В работе [14] предложен подход к определению отражательной симметрии на основе метода проекций, сводящийся к анализу преобразования Радона фигуры, при котором вычисляются соответствующие проекции. В основе метода лежит идея, что при отражении фигуры относительно прямой отражается её проекция на перпендикулярную прямую. Для оценки меры симметрии используется критерий χ-квадрат соответствия отражённой проекции исходной. Хотя такой метод способен очень быстро обрабатывать входные изображения с фигурами, близкими к идеально симметричным, находя для них «правильную» ось симметрии, результаты для недостаточно симметричных фигур (например, симметричных фигур с исключенной или добавленной частью) часто оказываются далеки от ожидаемых. Это можно объяснить тем, что работа исключительно с проекциями приводит к игнорированию значительной части информации о форме фигуры.

Отдельное направление исследования симметрии плоских фигур связано с анализом их скелетов [15], состоящих из точек, равноудалённых от двух и более участков границы фигуры. Таким образом, рёбра скелета, представленного в виде геометрического графа, можно рассматривать как локальные криволинейные оси симметрии. В работе [16] разработали алгоритм поиска наилучшей оси симметрии, основанный на наложении скелета фигуры и его отражения, представленных как цепочки скелетных примитивов. Цепочка, совпадающая сама с собой при оптимальном наложении, определяет начальную ось симметрии, которая затем уточняется путём её варьирования в границах, определённых геометрическими критериями – отклонением длин двух частей, на которые граница разбивается осью, от полупериметра фигуры и отклонением самой оси от центра масс фигуры [17]. Несмотря на то, что в большинстве случаев алгоритм приводит к обнаружению оптимальной оси симметрии, он по большому счёту является эвристическим и не подкреплён строгим теоретическим обоснованием, а также требует настройки ряда параметров. Сравнение методов отражательной симметрии на основе контурных [13] и скелетных методов [16,17] выполнено в работе [18].

Схема метода, предложенного в [19], такова: во-первых, вычисляется скелет входной 2D-формы и отбирается ряд эквидистантных точек от границы формы. Затем для описания двумерной формы строится 1D-функция. Эта функция называется функцией пограничного скелета (Boundary-Skeleton Function — BSF); он определяется как минимальные внутренние расстояния между граничными точками выборки и скелетом. Поскольку внутренние расстояния являются внутренними свойствами формы, BSF является изометрическим инвариантом и устойчива к граничному шуму. Затем вычисляются локальные экстремумы BSF, они разбивают функцию на ряд изогнутых сегментов. Каждый сегмент характеризуется вектором признаков, который фиксирует локальные особенности BSF. Наконец, зеркальная симметрия определяется при согласовании кривых сегментов функции. Однако экспериментальное исследование в работе было сделано на небольшом количестве простых искусственных фигур; неясно, как метод работает на естественных квазисимметричных объектах с перекрытиями, выступами и т. д.

Поскольку поиск меры симметрии (1) представляет собой решение задачи оптимизации некоторой эмпирической функции заданной значениями меры Жаккара для соответствующих аргументов, и эта функция не обладает «хорошими» свойствами (выпуклость, унимодальность, гладкость с точки зрения ограничений на значения в соседних отсчетах дискретной сетки) в работе [20] предлагается и исследуется использование генетических алгоритмов для поиска максимума функции симметрии. Оптимизация проводится не на всей области поиска, а путем уточнения начального решения. Исследована эффективность различных операторов отбора и кроссовера: в частности, наиболее эффективным показал себя пропорциональный отбор и равномерный и двухточечный кроссовер.

В итоге можно выделить основные распространённые недостатки методов, разработанных до 2020-го года: отсутствие гарантии того, что в результате их работы будет найден глобальный оптимум, неспособность адекватно оценить параметры симметрии квазисимметричных объектов и вычислительную трудоёмкость, особенно в том случае, когда допустимы скосы. Впрочем, наиболее современные работы практически нивелируют эти недостатки,

так в [21,22] предлагается подход к поиску глобального оптимума на сетке с помощью вычисления верхних оценок на меру Жаккара через преобразование Радона. Рассмотрены различные приёмы снижения временных затрат при вычислении меры Жаккара для заданной прямой. Анализируются различные стратегии перебора возможных осей симметрии, а также выбора начального приближения. Эксперименты показывают, что мера Жаккара, соответствующая оптимальной оси, найденной предложенным методом, не уступает результату полного перебора по осям, проходящим через точки контура объекта, с учётом скидки на погрешность вычислений, вызванную растеризацией. По скорости предложенный метод существенно превосходит разработанные ранее способы ограничения полного перебора.

3. Применение нейронных сетей к решению задачи поиска отражательной симметрии для бинарных растровых изображений. Практически на всех конференциях, на котором нами докладываются научные результаты и описываются разработанные нами методы поиска симметрии бинарных растровых изображений задаются вопросы и делаются предложения об использовании многослойных искусственных нейронных сетей (ИНС, глубокое обучение) для решения поставленной задачи. Однако, насколько нам известно, при всей популярности подходов на основе глубокого обучения, попыток использовать нейронные сети для оценки меры симметрии на бинарных растровых изображениях до сих пор не предпринималось.

В рамках настоящей статьи мы начали устранять этот пробел и планируем цикл работ, в частности, в начале мы исследуем возможность оценивания непосредственно степени симметричности фигуры, выражающейся в виде максимальной меры Жаккара между фигурой и её отражением относительно прямой. В новой постановке мы фактически переводим задачу из класса алгоритмических в область машинного обучения по прецедентам.

Мы будем следовать сложившемуся и ставшему уже вполне стандартным подходу к современному анализу изображений с использованием ИНС:

1. Выбор корпуса изображений;
2. Экспертная разметка изображений;
3. Аугментация данных;
4. Выбор функции потерь, архитектуры свёрточной нейронной сети;
5. Проведение экспериментов с целью подбора параметров ИНС;
6. Статистическая оценка качества результатов.

4. Выбор корпуса изображений. В качестве корпуса данных для обучения ИНС и проведения экспериментов мы использовали две базы данных. Первая – это широко известная база листьев растений [23]. База содержит 1907 изображений размером 800 на 600 пикселей, см. примеры изображений разных классов на рисунке 1 вверху. Бинаризованные изображения доступны для скачивания по адресу http://lda.tsu.tula.ru/papers/flavia.zip. Вторая база данных - база MPEG-7 CE Shape-1 Part B [24] содержит 1401 изображение, см. примеры на рисунке 1 внизу.

5. Экспертная разметка изображений. В качестве оценки степени симметричности каждого изображения мы используем процедуру полного перебора прямых, проходящих через все пары точек контура фигура, с построением отраженной копии фигуры и вычисления меры Жаккара (1). Процедура отражения фигуры относительно линии детально описана в работах [18,20,22]. Следует отметить, что поиск меры симметрии полным перебором всех возможных прямых, проходящих через пары точек на контуре фигуры является весьма вычислительно затратной процедурой, однако в отличие от быстрых приближенных методов [21,22] она обеспечивает эталонный результат. Набор полученных эталонных мер симметричности оформлен и зарегистрирован нами как база данных [25] и могут быть свободно использованы исследователями.

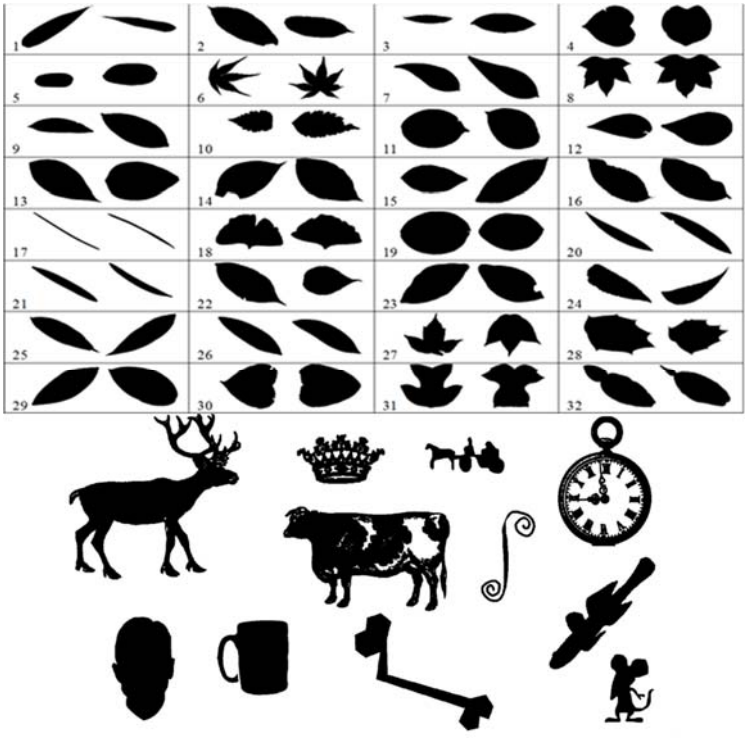


Рис. 1. Примеры изображений 32 классов листьев из базы FLAVIA (вверху) и из базы MPEG-7 CE Shape-1 Part B (внизу)

Впрочем, забегая несколько вперед, оказалось, что обеспечить обработку изображений такого размера с помощью ИНС оказалось невозможным и нам пришлось создать базу уменьшенных изображений. С учетом имеющихся вычислительных мощностей был выбран уменьшающий коэффициент равный четырем, т.е. мы в дальнейшей статье приводим результаты для изображений размером 200 на 150 пикселей. Для изображений такого размера также были получены эталонные меры симметричности.

Аугментация проводилась путем добавления в базу отраженных и сдвинутых копий изображений. Для каждого исходного изображения производилась операция сдвига по осям на случайное значение из небольшого диапазона, так чтобы фигура не выходила за пределы изображения – на практике сдвиги лежали в диапазоне в десятки пикселей. Такая процедура повторялась четыре раза и далее для каждого сдвинутого изображения выполнялась операция отражения относительно горизонтальной и вертикальной и обеих осей. Таким образом одно исходное изображение продуцировало 19 «новых» изображений. Операции сдвига и отражения относительно осей не изменяет пиксельную форму и площадь фигуры и, соответственно, новые изображения обладают мерой симметрии, совпадающей с мерой исходного изображения, нет необходимости в дополнительных расчетах. Таким образом база с аугментированными изображениями включала в себя 66 160 изображений. Максимальная мера симметрии равна 1.0, минимальная 0.22555, примеры изображений приведены на рис.2.

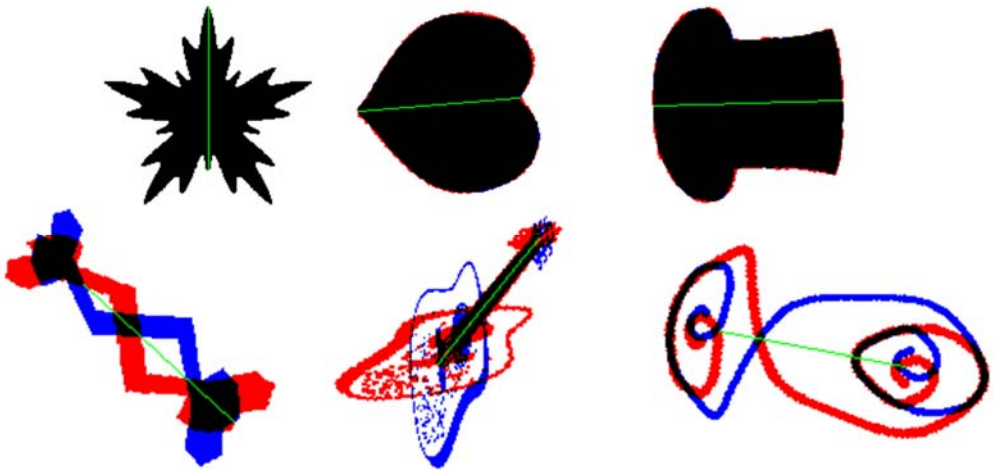


Рис. 2. Изображения из размеченной выборки с высоким (более 0.98, вверху) и низким (менее 0.35, внизу) значениями меры симметричности. Синим показано исходное изображение, красным его отражение относительно оптимальной оси, черным пересечение исходного и отраженного изображений

6. Выбор функции потерь, архитектуры свёрточной нейронной сети. Как было сказано ранее, каждое изображение в корпусе наделяется меткой – действительнозначным числом из интервала [0..1], что очевидно приводит к классу задач по восстановлению регрессионных зависимостей.

В качестве функции потерь мы выбрали среднекадратичную ошибку MSE, однако контроль значений производили на основе средней абсолютной величин отклонений MAE. Такая метрика более привычна с точки зрения ее восприятия человеком.

Мы использовали следующую архитектуру сверточной нейронной сети.

1. Свёрточный слой для двумерных данных (32 фильтра с функцией активации Relu, без добавления рамки на границах изображения (пэддинг, padding), размер ядра свертки 3 на 3);
2. Слой субдискретизации (пулинга) MaxPooling для двумерных данных (окно просмотра размера 2 на 2, с шагом перемещения равным окну просмотра, без пэддинга);
3. Свёрточный слой для двумерных данных (64 фильтра с функцией активации Relu, без пэддинга);
4. Слой пулинга MaxPooling для двумерных данных (окно просмотра размера 2 на 2, с шагом перемещения равным окну просмотра, без пэддинга);
5. Свёрточный слой для двумерных данных (128 фильтров с функцией активации Relu, без пэддинга);
6. Слой пулинга MaxPooling для двумерных данных (окно просмотра размера 2 на 2, с шагом перемещения равным окну просмотра без пэддинга);
7. Слой преобразования многомерных данных в одномерные (Flatten);
8. Полносвязный слой (16 нейронов с функцией активацией Relu);
9. Полносвязный слой (1 нейрон с функцией активации SoftSign).

Для 1, 3, 5, 8 и 9 слоев используется инициализация весов Ксавье для исключения стохастического результата обучения сети при нескольких запусках.

В ходе многочисленных экспериментов мы установили, что наилучший результат обучения достигается при использовании функции активации Softsign на последнем полносвязном слое:

$$y = \frac{x}{1+|x|}.$$

7. Проведение экспериментов с целью подбора параметров ИНС. Обучение ИНС проводилось на видеокарте Nvidia Tesla A100 40G, Мы определили размер одного субнабора данных для стохастического градиента (мини-батча) равным 150. В качестве оптимизатора мы выбрали Adam [26], так как он является одним и наиболее эффективных алгоритмов при обучении нейронных сетей. Так же при обучении мы сохраняем веса с той эпохи, в которой была достигнута наименьшая среднеквадратичная ошибка (MSE) на тренировочных данных, и затем используем сохраненные веса для проверки на тестовых данных.

В наших экспериментах число эпох было достаточно большим – 1200, из графиков на рисунке 3 видно, что среднее абсолютное отклонение MAE на валидационной выборке стабилизировалась к 200 эпохе. Для обучающей выборки среднее абсолютное отклонение MAE составило 0.00198, максимальное отклонение MaxErr = 0.04966. Для валидационной выборки эти показатели были равны соответственно MAE=0.04675, MaxErr=0.50031.

Кривые подгонки значений симметричности, предсказанных ИНС для обучающей и валидационной выборок изображений, показаны на рис 4 и 5, сортировка произведена по эталонной мере симметричности, показаны значения только для исходных изображений (аугментированные данные исключены при построении графиков).

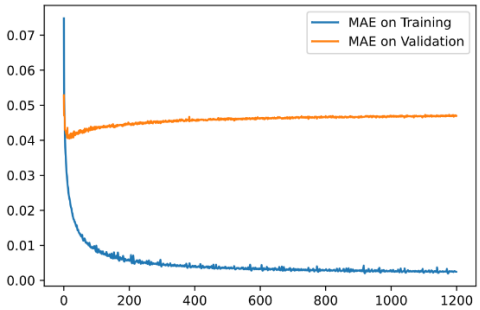


Рис. 3. Кривая значений среднего абсолютного отклонения MAE по эпохам для обучающей и валидационной выборок

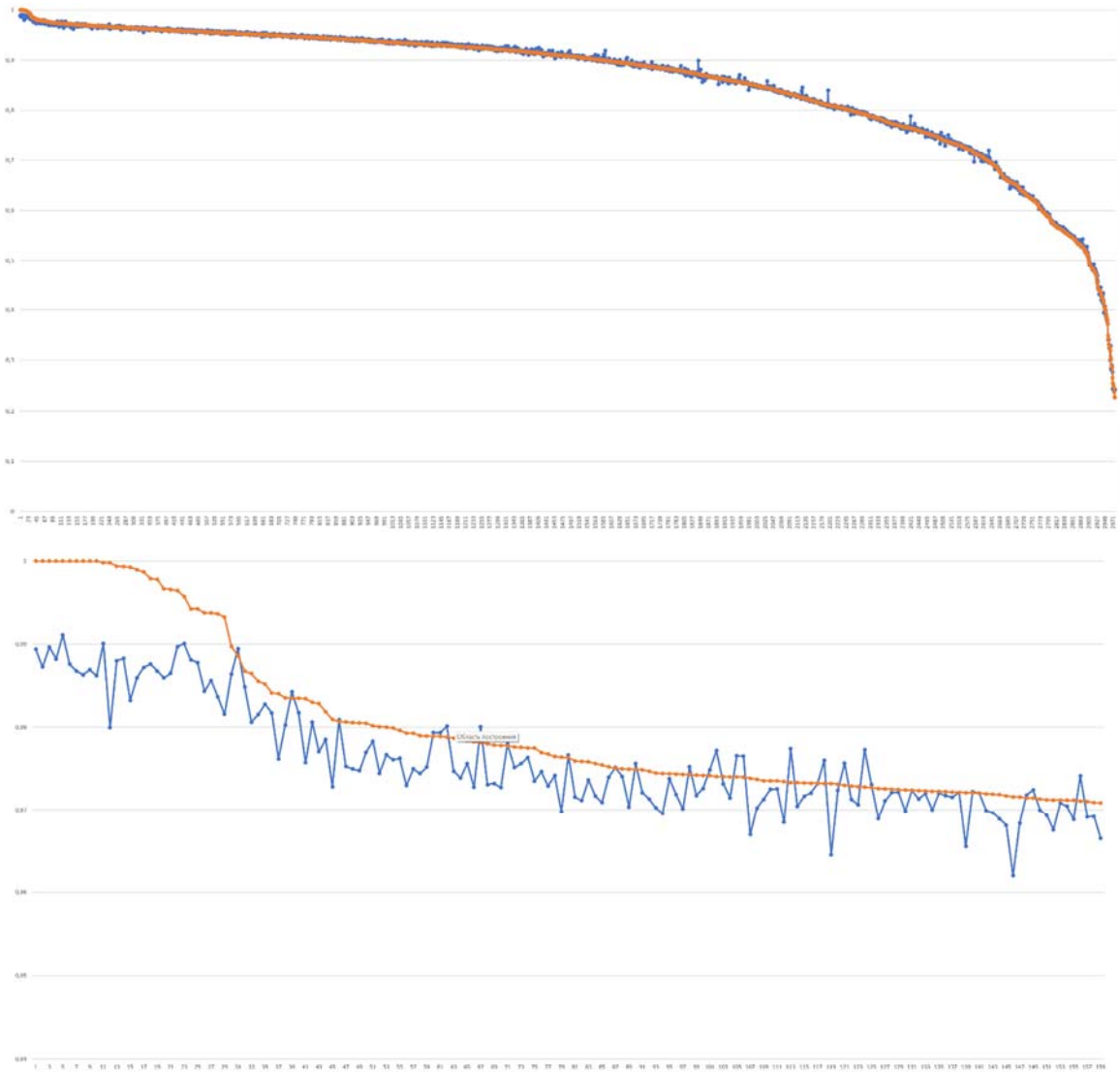


Рис. 4. Кривая подгонки значений симметричности (синий) предсказанных ИНС для обучающей выборки изображений, на нижнем рисунке показаны первые 160 значений. Сортировка выполнена по эталонной мере симметричности (оранжевый цвет)

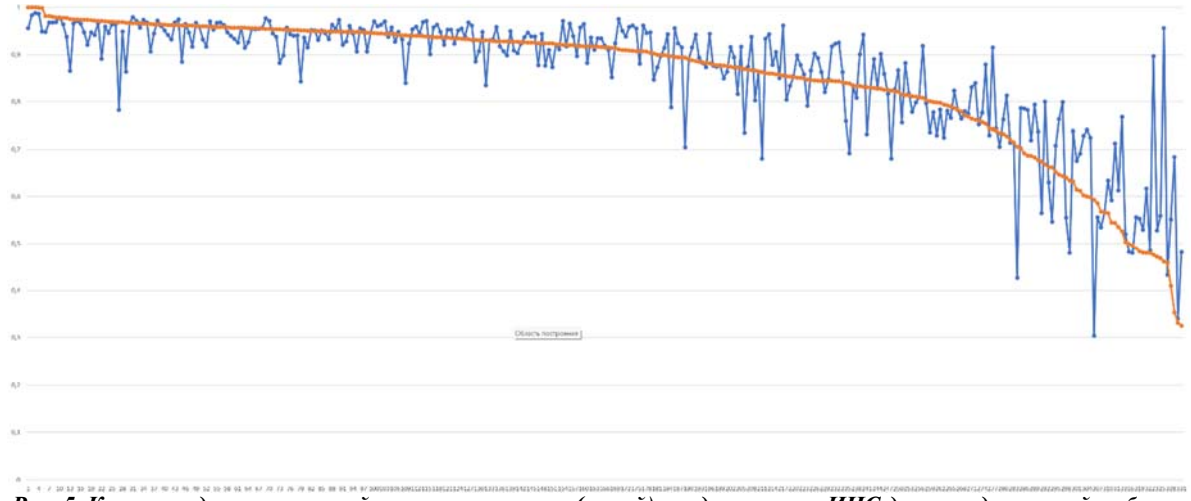


Рис. 5. Кривая подгонки значений симметричности (синий) предсказанных ИНС для валидационной выборки изображений, отсортированных по эталонной мере симметричности (оранжевый цвет)

Статистическая оценка качества результатов проводилась с использованием процедуры кросс-проверки. Выполнялось случайное разделение набора данных на 25 равных подвыборок с последовательным переобучением на корпусе, состоящем из 24/25 массива данных и тестированием 1/25, т.е., применялась стандартная процедура 25-fold cross validation. Осуществлялся контроль, чтобы в процессе эксперимента аугментированные копии изображения не переносились между подвыборками (обучение/тест). Результат кросс-проверки как среднее абсолютное отклонение составил 0.04215, максимальное отклонение, которое было получено 0.55229. На рис. 6 приведен график, отсортированных по эталонному значению симметричности результатов предсказанных значений во время кросс-проверки.

Следует отметить, что использование аугментации привело к незначительному снижению качества при проведении процедуры кросс-проверки, так для данных без аугментации среднее абсолютное отклонение для тестовой выборки составило MAE= 0.044836.

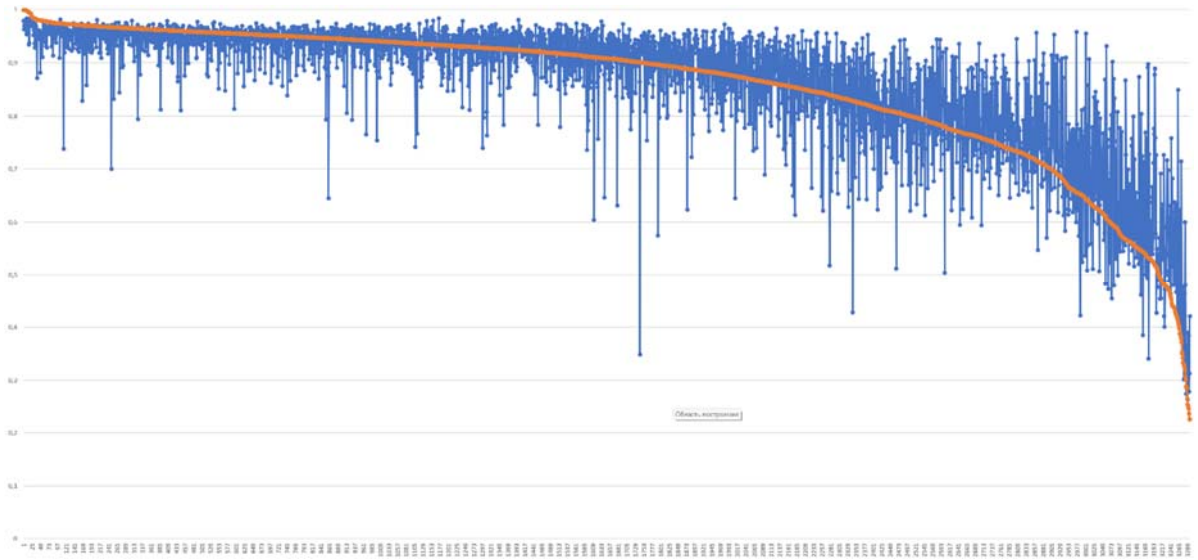


Рис. 6. Кривая подгонки значений симметричности (синий) предсказанных ИНС при процедуре кросс проверки, сортировка выполнена по эталонной мере симметричности (оранжевый)

Время поиска меры симметрии для одного изображения размером 200 на 150 составило в среднем 0.3 мс.

Заключение. В работе предложено использовать машинное обучение по прецедентам на основе сверточной нейронной сети для решения задачи оценивания меры отражательной симметрии. В качестве меры использовалось максимальное подобие Жаккара между исходной фигурой и отраженной относительно некоторой оси. Обучающая выборка представляет собой несколько тысяч бинаризованных изображений, мера симметрии на которых подсчитана на основе процедуры полного перебора возможных осей, пересекающих фигуру. Расширение базы выполнено случайными смещениями и фиксированными отражениями исходных изображений. Подобрана архитектура и параметры нейронной сети, обеспечивающие среднее абсолютную ошибку на кросс-проверке равную около 0.042.

Дальнейшее исследование связаны с повышением точности и решением задачи о нахождении непосредственно оси симметрии. Остаётся открытым вопрос об использовании ассиметричной функции потерь, существенно сильнее штрафующей превышение предсказанного значения над эталонным.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №22-21-00575 https://rscf.ru/project/22-21-00575/.

Список литературы

1. M. C. Corballis, “Bilaterally Symmetrical: To Be or Not to Be?”, Symmetry, vol. 12, no. 3, paper 326, 2020.
2. P. J. Van Otterloo, A contour-oriented approach to shape analysis. Prentice Hall International (UK) Ltd., GBR, 1991.
3. S. Sheynin, A. Tuzikov, and D. Volgin, “Computation of Symmetry Measures for Polygonal Shapes,” in Computer Analysis of Images and Patterns, Proceedings of 8th International Conference, F. Solina and A. Leonardis, Eds. Springer, 1999, pp. 183–190.
4. E. M. Arkin, L. P. Chew, D. P. Huttenlocher, K. Kedem, and J. S. B. Mitchell, “An Efficiently Computable Metric for Comparing Polygonal Shapes,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 13, no. 3, pp. 209–216, 1991.
5. X. Yang, N. Adluru, L. J. Latecki, X. Bai, and Z. Pizlo, “Symmetry of Shapes Via Self-similarity,” in Advances in Visual Computing (ISVC), Proceedings of 4th International Symposium, Part II, G. Bebis, R. D. Boyle, B. Parvin, D. Koracin, P. Remagnino F. M. Porikli, J. Peters, J. T. Klosowski, L. L. Arns, Y. K. Chun, T.-M. Rhyne, L. Monroe, Eds. Springer, 2008, pp. 561–570.
6. L. J. Latecki and R. Lakämper, “Convexity Rule for Shape Decomposition Based on Discrete Contour Evolution,” Computer Vision and Image Understanding, vol. 73, no. 3, pp. 441–454, 1999.
7. H. Ling and D. W. Jacobs, “Shape classification using the inner-distance,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 29, no. 2, pp. 286–299, 2007.
8. Z. Li, “Robust Symmetry Detection for 2D Shapes Based on Electrical Charge Distribution,” Journal of Information and Computational Science, vol. 11, pp. 2887–2894, 2014.
9. E. Li and H. Li, “Reflection Invariant and Symmetry Detection”, arXiv preprint, arXiv:1705.10768, 2017.
10. R. K. K. Yip, “A Hough transform technique for the detection of reflectional symmetry and skew-symmetry,” Pattern Recognition Letters, vol. 21, no. 2, pp. 117–130, 2000.
11. R. K. K. Yip, “A Hough transform technique for the detection of parallel projected rotational symmetry,” Pattern Recognition Letters, vol. 20, no. 10, pp. 991–1004, 1991.
12. A. Bruckstein and D. Snaked, “Skew symmetry detection via invariant signatures,” Pattern Recognition, vol. 31, no. 2, pp. 181–192, 2008.
13. L. Mestetskiy and A. Zhuravskaya, “Method for Assessing the Symmetry of Objects on Digital Binary Images Based on Fourier Descriptor,” ISPRS — International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W12, pp. 143–148, 2019.
14. T. P. Nguyen, “Projection based approach for reflection symmetry detection,” ICIP 2019: Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing, pp. 4235–4239, 2019.
15. L. Mestetskiy and A. Semenov, “Binary image skeleton – continuous approach,” in VISAPP 2008: Proceedings of the Third International Conference on Computer Vision Theory and Applications, A. Ranchordas and H. Araújo, Eds., INSTICC, pp. 251–258, 2008.
16. O. Kushnir, S. Fedotova, O. Seredin, and A. Karkishchenko, “Reflection symmetry of shapes based on skeleton primitive chains,” Analysis of Images, Social Networks and Texts (AIST 2016), Proceedings; Communications in Computer and Information Science, vol. 661, Springer, Cham, pp. 293–304, 2016.
17. O. Kushnir, O. Seredin, and S. Fedotova, “Algorithms for Adjustment of Symmetry Axis Found for 2D Shapes by the Skeleton Comparison Method,” ISPRS — International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W12, pp. 129–139, 2019.
18. Seredin, O. S. Comparative analysis of reflection symmetry detection methods in binary raster images with skeletal and contour representations / O. S. Seredin, O. A. Kushnir, S. A. Fedotova // Computer Optics. – 2022. – Vol. 46, No. 6. – P. 921-928. – DOI 10.18287/2412-6179-CO-1115.
19. D. Niu, C. Zhang, W. Li, Y. Zhou, “A Novel Approach for Detecting Symmetries in Two-dimensional Shapes,” Journal of Information & Computational Science, vol. 12, no 10, pp. 3915–3925, 2015.
20. Применение генетического алгоритма для поиска зеркальной симметрии бинарных растровых изображений / О. С. Середин, Д. А. Орлов, Н. А. Ломов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 10. – С. 292-305. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-10-292-305. – EDN MBZZIE.
21. Определение оптимальной оси отражательной симметрии с точки зрения меры Жаккара методом проекций / Н. А. Ломов, О. С. Середин, О. А. Кушнир, Д. В. Ляхов // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению «Графикон». – 2022. – № 32. – С. 715-727. – DOI 10.20948/graphicon-2022-715-727. – EDN HAUULG.
22. Lomov, N., Seredin, O., & Kushnir, O. (2022, September). Detection of the Optimal Reflection Symmetry Axis with the Jaccard Index and the Radon Transform. In 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (pp. 489-498). IEEE.
23. S. G. Wu, F. S. Bao, E. Y. Xu, Y. X. Wang, Y. F. Chang, and Q. L. Xiang, “A leaf recognition algorithm for plant classification using probabilistic neural network,”, 2007 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, pp. 11–16, 2007.
24. L. J. Latecki, R. Lakamper Shape similarity measure based on correspondence of visual parts //IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – Т. 22. – №. 10. – p. 1185-1190, (2000).
25. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. База данных эталонных параметров отражательной и центральной симметрии для набора бинарных растровых изображений: заявл. октябрь 2023 : опубл. ноябрь 2023 / О.С. Середин, Н.А. Ломов, Д.В. Ляхов, О.А. Кушнир.
26. Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980.

Середин Олег Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, в.н.с., oseredin@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ляхов Даниил Викторович, студент, liakhov.daniil@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ломов Никита Александрович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, nikita-lomov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS TO SOLVING THE PROBLEM OF FINDING REFLECTIVE SYMMETRY FOR BINARY RASTER IMAGES

O.S. Seredin, D.V. Liakhov, N.A. Lomov

The paper proposes to use machine learning based on use cases based on a convolutional neural network to solve the problem of estimating a measure of reflective symmetry based on the Jaccard similarity. The training sample consists of several thousand binarized images, the measure of symmetry on which is calculated based on the procedure of a complete search of possible axes intersecting the figure. The base augmentation is performed by random offsets and fixed reflections of the original images. The architecture and parameters of the neural network have been selected, providing a mean absolute error on cross-validation equal to about 0.042.

Key words: binary raster images, reflection symmetry, Jaccard measure, convolutional neural network

Seredin Oleg Sergeevich, candidate of physics and mathematical science, docent, leading researcher, oseredin@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University.

Liakhov Daniil Viktorovich, student, liakhov.daniil@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University.

Lomov Nikita Alexandrovich, candidate of physics and mathematical science, senior researcher, nikita-lomov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 343.148.63
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-22-23

ОБЗОР МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ДТП И ИХ ОГРАНИЧЕНИЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ПРАВОВОЙ БАЗЫ

В.А. Жулай, Е.А. Тарасов, Е.В. Тарасова, А.В.Ульянов

Дорожно-транспортные происшествия являются основной проблемой с точки зрения общественной безопасности в России и во многих других странах мира. Специалисты по реконструкции стремятся облегчить свою работу и предложить максимально точные результаты, используя различные методы реконструкции, от численного моделирования до программного моделирования столкновений, в которых участвуют транспортные средства. В зависимости от условий дорожно-транспортного происшествия может быть использовано несколько методик при надлежащей валидации. Однако национальные правовые рамки могут рассматриваться как препятствия для использования большого разнообразия методов реконструкции. Следовательно, эта область исследований должна быть дополнительно развита, чтобы расширить выбор экспертов, особенно в контексте стремительного развития автомобильной промышленности.

Ключевые слова: ДТП, расследование дорожно-транспортных происшествий, механизм ДТП, реконструкция ДТП.

Цель настоящей статьи - предложить обзор методов реконструкции дорожно-транспортных происшествий, основанных на методологиях, которые считаются действительными на данный момент в соответствии со специальной литературой. Кроме того, эти методы реконструкции затем анализируются с юридической точки зрения, с точки зрения общего использования в Российской Федерации, по сравнению с другими странами. В этой связи также важно иметь представление об общих цифрах, когда речь заходит о смертельных исходах в дорожно-транспортных происшествиях, что подчеркивает необходимость альтернативных методов реконструкции аварий.

Дорожно-транспортные происшествия по-прежнему являются причиной большого числа смертельных исходов в Российской Федерации. Самые последние данные показывают, что, например, 2020 год - это первый год со снижением уровня смертности на миллион жителей на 11% по сравнению с 2014 годом.

Однако это также может быть прямым результатом карантина на национальном уровне из-за вспышки пандемии COVID-19, когда поездки были ограничены неотложными потребностями, а не в результате улучшения инфраструктуры или кампаний по повышению осведомленности в рамках государственной политики, продвигаемой на национальном уровне. Та же тенденция относительно 2020 года наблюдается и на европейском уровне: в среднем снижение составило 17%, в то время как, напротив, предварительные данные в Соединенных Штатах показывают, что число смертей в результате дорожно-транспортных происшествий увеличилось во время пандемии.

Динамика смертности в результате дорожно-транспортных происшествий в Российской Федерации показывает, что даже при наличии нисходящей тенденции целевые показатели РФ на 2020 год не были достигнуты. Также из-за ситуации с пандемией многие города сделали выбор в пользу расширения возможностей зеленой мобильности и избегания переполненных транспортных средств, таким образом, число пользователей велосипедов на ежедневной основе увеличилось. Однако также известно, что около 70% дорожно-транспортных происшествий со смертельным исходом происходят с участием пешеходов, мотоциклистов и велосипедистов как уязвимых участников дорожного движения. В этой связи существует явный призыв к продвижению политики в области безопасности дорожного

движения и совершенствованию инфраструктуры и средств мониторинга дорожного движения, с тем чтобы обеспечить уязвимым участникам дорожного движения безопасные условия для их поездок, особенно в городских районах.

Методы и средства реконструкции дорожно-транспортных происшествий

1. Численное моделирование. В соответствии с данными, полученными с места аварии (такими как конечное положение задействованных транспортных средств, следы шин в процессе торможения, осколки транспортных средств или других разбившихся предметов, пластическая деформация деталей транспортного средства), выбирается алгоритм аналитического определения кинематических и динамических параметров транспортного средства и адаптируется. Таким образом, обычно используются следующие методы: использование фундаментальных законов механики для реконструкции дорожно-транспортных происшествий; определение скоростей движения транспортного средства до и после столкновения с использованием закона сохранения количества движения; определение скорости транспортного средства с использованием принципа сохранения энергии; оценка определения состояния транспортного средства до столкновения и пройденного расстояния с использованием тормозных путей; оценка пройденного расстояния и времени, необходимого на различных этапах события; численное моделирование столкновения транспортного средства с пешеходом; численное моделирование столкновения транспортного средства с мотоциклом; определение скорости транспортного средства на основе травм, полученных уязвимыми участниками дорожного движения (пешеходами и водителями мотоциклов).

2. Компьютерное моделирование. Самые первые программы моделирования динамического поведения транспортного средства появились еще в 1960 году, когда предложенные модели давали более или менее упрощенное моделирование взаимодействия транспортного средства с другими элементами окружающей среды, в некоторых случаях даже с другими транспортными средствами. Затем были разработаны другие подобные программы для того, чтобы имитировать поведение транспортного средства сначала без помех, а затем с постепенным введением ряда параметров, чтобы дать более точную картину реального столкновения. Необходимость разработки программного обеспечения для моделирования дорожно-транспортных происшествий была вызвана тем фактом, что производители автомобилей в России сохраняют конфиденциальность данных, касающихся конструктивного поведения транспортных средств, в отличие от Соединенных Штатов, где обнародуются приблизительные результаты испытаний транспортных средств. В связи с этим наиболее часто используемой программой моделирования в России является PC-Crash, которая использует методы сохранения импульса, а также имитирует траекторию движения транспортного средства до и после столкновения. Рабочий режим состоит из нескольких циклов моделирования до тех пор, пока полученные результаты не совпадут со следами, обнаруженными на месте происшествия.

Точность такого моделирования обычно определяется входными параметрами, выбранными пользователем, и проверка результатов всегда должна производиться на основе места аварии и, в конечном счете, зарегистрированных значений динамических параметров транспортного средства.

3. Видеозаписи. Другим методом реконструкции дорожно-транспортных происшествий является анализ видеозаписей во время столкновения. Таким образом, можно определить динамические параметры столкновения, которым предшествует калибровка полученных изображений. Литература в области реконструкции автомобильных аварий рассматривает это направление с точки зрения анализа данных, полученных камерами наблюдения за дорожным движением. Анализ видеозаписей также был подтвержден в экспериментальных условиях ранее проведенными исследованиями.

4. Поиск аварийных данных. Согласно управлению безопасности дорожного движения, поиск данных о событиях (EDR) определяется как устройство, установленное на дорожных транспортных средствах, которое записывает несколько параметров за время, заданное в секундах до дорожно-транспортного столкновения, таких как динамика транспортного средства до столкновения и состояние системы, вводимые данные водителем, статус использования/развертывания ограничения или активация автоматического уведомления о сбое. Важность EDR признается уже более 20 лет, как в Соединенных Штатах, так и в России, наряду с подчеркиванием потенциала предотвращения дорожно-транспортных происшествий.

Поиск аварийных данных (CDR) - это инструмент, используемый для извлечения данных из EDR, который в настоящее время производится в больших масштабах тремя производителями, в основном с одинаковыми принципами работы. CDRS - это, по сути, программные средства, способные извлекать отчеты из EDR, чтобы иметь четкое представление о динамических параметрах автомобиля за секунды до аварии. В связи с этим было проведено несколько исследований с целью проверки точности данных о предварительном столкновении, записанных EDRs, и эффективности их извлечения CDRs.

Правовые ограничения на использование реконструкции дорожно-транспортных происшествий. Национальная правовая база России охватывает обязанности, атрибуты и условия проведения технического освидетельствования и судебной экспертизы в области дорожно-транспортных происшествий. Таким образом, реконструкция дорожно-транспортных происшествий представляет собой основное средство пробации, хотя оно и не является обязательным и может быть запрошено любой из вовлеченных сторон - прокурором, судьей или даже физическими лицами.

Согласно Федеральное бюджетное учреждение Российский федеральный центр судебной экспертизы при Министерстве юстиции Российской Федерации, должны быть оценены, рассчитаны или описаны следующие данные: определение динамики аварии на основе средств пробации, найденных и проанализированных на месте аварии, оценка скорости движения задействованного транспортного средства до столкновения, направление (направления) движения транспортного средства, предполагаемое перемещение транспортных средств, установление точки столкновения и места аварии; установление временных рамок, в течение которых имело место несколько последовательностей дорожно-транспортного происшествия (ускорение, торможение, поворот с целью избежать столкновения и т.д.). Согласно той же процедуре, средства для предотвращения дорожно-транспортного происшествия и несчастные случаи также анализируются для того, чтобы судебные органы могли установить вину в рамках судебного разбирательства.

С международной точки зрения, исследование, проведенное Европейской ассоциацией по исследованию и анализу аварий, дает общее представление об общих целях специалистов по реконструкции и их профиле в разных европейских странах, которые варьируются от определения деталей аварии (таких как скорости, время и расстояния)

и могут выходить за рамки в углубленный анализ столкновения (техническое состояние задействованных транспортных средств, биомеханическая нагрузка во время удара, технические сбои систем задействованных транспортных средств или даже неисправности систем мониторинга дорожного движения с целью оценки ответственности дорожного управления в случае аварии) или, в некоторых случаях, покрытие расходов на оценку ремонта транспортных средств или судебных разбирательств, вызванных дорожно-транспортным происшествием. Однако примечательно, что исключительно с целью реконструкции дорожно-транспортных происшествий в таких странах, как Эстония, Франция, Венгрия и Нидерланды, специалисты по реконструкции обычно используют такие программы, как PC-Crash, Carat, Analyzer, Rollei-Metric или PC-Rect. Кроме того, в том же исследовании подчеркивается, что есть такие страны, как Финляндия, где зарегистрированные данные о дорожно-транспортных происшествиях активно используются в качестве средства продвижения политики безопасности дорожного движения.

Выводы. Учитывая разнообразие средств и методологий, предназначенных для получения точной картины в случае дорожно-транспортного происшествия, специалисты по реконструкции могут использовать их для получения точных результатов судебной экспертизы. Несмотря на то, что в российской системе активно применяется численное моделирование, мы считаем, что можно было бы провести дальнейшие исследования и аргументацию, чтобы облегчить работу специалистов по реконструкции и инициировать массовое использование инструментов, направленных как на анализ причин дорожно-транспортных происшествий, так и на предотвращение их возникновения.

В связи с этим использование технических данных транспортного средства и поведения водителя до дорожно-транспортного столкновения стало бы дальнейшим шагом для повышения безопасности дорожного движения, наряду с углубленным и основанным на фактических данных анализом всех факторов, способствующих столкновению, особенно при получении серьезных травм или даже со смертельным исходом.

Для надлежащей проверки методов реконструкции и их осуществимости в реальных условиях использования, необходим соответствующий алгоритм, который учитывал бы как экспериментальное тестирование в контролируемых условиях, так и анализ реального дорожно-транспортного происшествия. В связи с этим испытываемое транспортное средство должно быть оснащено средствами сбора данных для расчета погрешности между зарегистрированными параметрами и расчетными с помощью предлагаемых методик реконструкции. Аналогичным образом, в случае реального дорожно-транспортного происшествия транспортные средства должны быть оснащены EDR для той же цели проверки. В конечном счете, рассчитанные погрешности должны быть сопоставлены между двумя сценариями (лабораторными и реальными условиями) для надлежащей проверки осуществимости методов.

Более подробно предлагается инсценировать аварию (столкновение транспортного средства с транспортным средством, транспортного средства с неподвижным объектом или транспортного средства с уязвимым участником дорожного движения) в экспериментальных условиях. Испытываемое транспортное средство должно быть оснащено GPS и акселерометрами для определения динамических параметров (скорость движения и расстояние, ускорения), а также устройствами для антропометрического тестирования (ATDS), также оснащенными средствами сбора динамических параметров (например, акселерометрами). В то же время столкновение должно быть зарегистрировано с помощью видеооборудования, а затем, основываясь на конечном положении транспортного средства, специалист по реконструкции должен приступить к численному моделированию на основе данных, собранных с места аварии (размер деформаций, тип и материалы задействованного транспортного средства и т.д..), в зависимости от типа столкновения. Затем результаты, полученные с использованием каждого из этих методов с точки зрения ускорений и замедлений на уровне транспортного средства и ATDs, пройденного расстояния и скоростей столкновения, следует сравнить с параметрами, измеренными в ходе испытания. Затем рекомендуется рассчитать погрешность, чтобы дать более точное представление о целесообразности этих методов. Аналогичным образом, использование таких методов для сценария реального случая может быть проведено для того, чтобы облегчить сравнение средств реконструкции между реальным случаем и экспериментальным сценарием.

Список источников

1. Применение дифференцированных значений времени реакции водителя в экспертной практике. ВНИИСЭ. М.: 1987

2. Применение в экспертной практике параметров торможения автотранспортных средств (Методические рекомендации для экспертов). РФЦСЭ. М.: 1995.

3. Ruhl R. L., Senalik C. A., Southcombe E. J. Numerical methods for evaluating ECM data in accident reconstruction and vehicle dynamics // SAE Paper No. 2003-01-3393, Society of Automotive Engineers, Warrendale. 2003.

4 Fittanto D. A., Ruhl R. A., Southcombe E. J., Burg H., Burg J. Overview of Carat-4, a vulti–body simulation and collision modeling program // SAE Paper No. 2002-01-1566, Society of Automotive Engineers, Warrendale. 2002.

5. Day T. D., Siddall D. E. Three-dimensional reconstruction and simulation of motor vehicle accidents // SAE Paper No. 960890, Society of Automotive Engineers, Warrendale. 1996.

Жулай Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры, zhulai@vgasu.vrn.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

Тарасов Евгений Александрович, канд. техн. наук, 382652@mail.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

Тарасова Елена Владимировна, преподаватель, elena.tarasova@ro.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

Ульянов Алексей Васильевич, старший преподаватель, ua1980@vgasu.vrn.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет

REVIEW OF ACCIDENT RECONSTRUCTION METHODS AND THEIR LIMITATIONS FROM THE POINT OF VIEW OF THE NATIONAL LEGAL FRAMEWORK

V.A. Zhulai, E.A. Tarasov, E.V. Tarasova, A.V.Ulyanov

Road traffic accidents are a major problem from the point of view of public safety in Russia and in many other countries of the world. Reconstruction specialists strive to simplify their work and offer the most accurate results using various reconstruction methods, from numerical modeling to software simulation of collisions involving vehicles. Depending on the conditions of a traffic accident, several techniques can be used with proper validation. However, national legal frameworks can be seen as obstacles to the use of a wide variety of reconstruction methods. Consequently, this area of research should be further developed in order to expand the choice of experts, especially in the context of the rapid development of the automotive industry.

Key words: traffic accident, investigation of traffic accidents, the mechanism of an accident, the reconstruction of an accident.

Zhulai Vladimir Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, zhulai@vgasu.vrn.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Tarasov Evgeny Alexandrovich, candidate of technical sciences, 382652@mail.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Tarasova Elena Vladimirovna, teacher, elena.tarasova@ro.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Ulyanov Alexey Vasilyevich, senior lecturer, ua1980@vgasu.vrn.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University

УДК 621.3.09
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-25-26

СОЗДАНИЕ ДАТАСЕТА ПО ЭМПИРИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН В ИОНОСФЕРЕ

А.О. Щирый

Представлены результаты обработки более 5500 ионограмм наклонного зондированию среднеширотных ионосферных радиолиний непрерывными сигналами с линейно-частотной модуляцией, в ходе которой выявлялись эмпирические модели многолучевости – комбинации определенных типов мод ионосферного распространения декаметровых радиоволн: выявленные эмпирические модели многолучевости, а для наиболее вероятных моделей – статистика вариаций относительных частотных границ и межмодовых задержек. Полученные данные могут быть использованы в качестве обучающего датасета для тренировки статистических моделей методами теории обучения машин.

Ключевые слова: ионосфера, распространение коротких радиоволн, многолучевость, наклонное радиозондирование, ионограмма.

Длина волн декаметрового (ДКМ) диапазона заметно меньше характерных масштабов регулярных ионосферных образований, что позволяет использовать для рассмотрения распространения волны приближение геометрической оптики, т. е. рассматривать волну в виде луча или набора лучей. Важно также, что этот подход позволяет затем перейти от лучевой трактовки распространения радиосигналов в ионосфере к радиотехническому описанию их распространения в линейных цепях [1, 2].

Короткие волны (КВ) могут распространяться на многие тысячи километров путем многократных последовательных отражений от ионосферы и земной поверхности. КВ радиолиниям большой протяженности (тысячи километров) присуща многолучевость распространения радиосигнала, когда в точку приема одновременно приходит несколько лучей (мод). Если при приеме лучи не разделяются системой связи, то имеет место их интерференция, приводящая к биениям и замираниям сигнала. Разные лучи при этом проходят в ионосфере различные расстояния, отражаются от различных уровней (высот) ионосферы, испытывают разное поглощение. Условия многолучевого распространения КВ радиоволн зависят от множества суточных, сезонных, гео- и гелиофизических факторов, протяженности и географического положения радиолинии и др.

Для систематизации результатов исследования эффектов многолучевого распространения КВ в [3] был предложен подход классификации по т.н. эмпирическим моделям многолучевости (ЭММЛ), когда диапазон распространения разбивается на интервалы по числу и типам мод распространения сигнала, а ось частот нормирована относительно максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ). Однако в работе [3] не был затронут ряд важных характеристик многолучевости, в том числе из-за ограничений измерительной аппаратуры.

Современным методом исследования модовой структуры распространения КВ является наклонное зондирование ионосферы (НЗИ) непрерывными сигналами с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ). Результатом работы ионозонда является ионограмма, характеризующая зависимость амплитуды сигнала от частоты и времени группового запаздывания [2,4-7]. При непосредственном участии автора были созданы и развиты соответствующие методики измерений и аппаратно-программные измерительные комплексы [4-10].

Целью данной работы является разметка массива экспериментальных данных – ионограмм НЗИ, посредством выявления ЭММЛ и классификации характеристик радиолиний по выявленным ЭММЛ. Размеченные таким

образом данные могут быть использованы в качестве обучающего датасета для тренировки статистических моделей методами теории обучения машин [11,12]. Ранее классификация данных НЗИ по ЭММЛ использовалась нами при исследовании свойств амплитудно-частотных характеристик КВ радиоканалов [13-15].

1. Условия проведения экспериментов. В данной работе были использованы данные НЗИ на трех радиотрассах: Хабаровск – Йошкар-Ола, Великобритания – Йошкар-Ола, Кипр – Йошкар-Ола.

Таблица 1

Координаты приемного и передающих пунктов

Номер пункта	Название пункта	Широта	Долгота
1	Йошкар-Ола	056.6 сев. ш.	047.8 вост. д.
2	Хабаровск (пос. Вяземский)	047.5 сев. ш.	134.7 вост. д.
3	Великобритания (Inskip)	054.0 сев. ш.	003.0 зап. д.
4	Кипр	035.0 сев. ш.	034.0 вост. д.

Таблица 2

Некоторые параметры радиотрасс

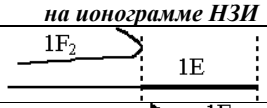
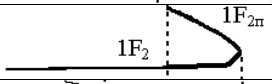
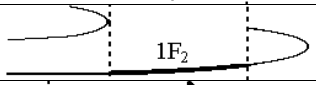
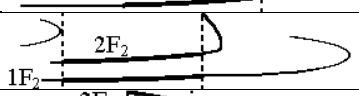
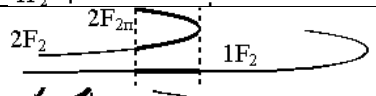
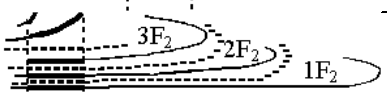
Номер трассы	Пункты передачи – приема	Длина трассы, км	Начальная – конечная частоты излучения, МГц
2-1	Хабаровск – Йошкар-Ола	5700	4 – 30
3-1	Великобритания – Йошкар-Ола	3100	4.2 – 30 (32)
4-1	Кипр – Йошкар-Ола	2600	5 – 30 (32)

Координаты приемного и передающих пунктов приведены в таблице 1; длина трасс и диапазон излучаемых частот – в таблице 2; далее в тексте будем называть трассы по их номеру. Все три трассы относятся к среднеширотным, однако, имеют разную географическую ориентацию: восток-запад, запад-восток и юг-север для трасс 2-1, 3-1, 4-1 соответственно. Трассы покрывают различные часовые пояса. На трассе 2-1 вследствие ее протяженности отсутствует прохождение односкачковых мод (в отличие от трасс 3-1, 4-1). Широта приемного пункта 1 близка к широте передающего пункта 3, а долгота приемного пункта 1 близка к долготе передающего пункта 4, так что трассы 3-1 и 4-1 образуют угол близкий к прямому. Все это обуславливает разные условия прохождения радиоволн на радиотрассах 2-1, 3-1, 4-1. Скорость перестройки частоты зондирующего ЛЧМ-сигнала для всех трасс была равна 100 кГц/с. Верхний частотный предел диапазона зондирования (см. табл.2) на трассах 3-1, 4-1 в экспериментах конца 2002 – 2003 гг. был равен 32 МГц, в других – 30 МГц. Тип приемной антенны в пункте 1 – широкополосный горизонтальный диполь; тип передающей антенны в пункте 2 – горизонтальный ромб, а в пунктах 3 и 4 – антенны типа ЛПА. Выборка ионограмм охватывает все сезоны года; ионограммы снимались, как правило, круглосуточно с периодом 15 минут. Всего было обработано около 5560 ионограмм. Обычно оцифрованный сигнал разностной частоты разбивается на элементы длительностью 0.4 секунды с перекрытием 50 %, так, что б база элемента составляла $0.4 \cdot 10^5$; а разрешающая способность по задержке равна 25 мкс, разрешающая способность по частоте – 100 кГц. Перед применением процедуры БПФ, элементы сигнала умножаются на весовую функцию Хемминга. В данной работе для увеличения разрешения по рабочей частоте, было увеличено перекрытие выборок сигнала разностной частоты, т.о. разрешение по рабочей частоте составило 20 кГц.

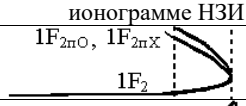
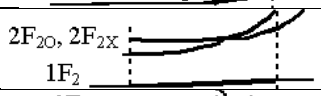
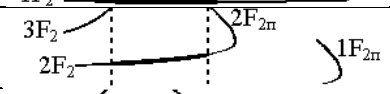
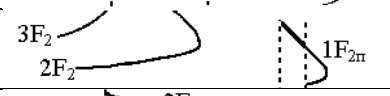
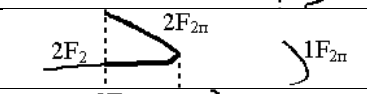
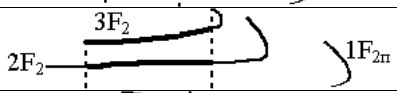
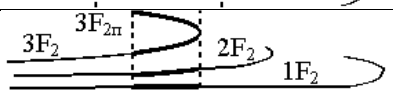
2. Выявленные эмпирические модели многолучевости. ЭММЛ выявлялись и получали свои номера по мере увеличения выборки ионограмм. Поэтому порядок следования ЭММЛ на “классической” “хорошей” ионограмме (сигнал сильный, для основных мод КВ радиосигнала наблюдается прохождение и нижних и верхних лучей) не всегда совпадает с порядком нумерации. На рисунке показан порядок следования ЭММЛ на такой “классической” ионограмме. Все выявленные ЭММЛ представлены в таблице 3, обозначения мод на рисунках в таблице даны для односкачковых радиолиний. Далее в тексте, для краткости, так же обозначения мод будем приводить для односкачковых радиолиний, подразумевая для двухскачковых соответствие согласно табл.3, если нет особых оговорок.

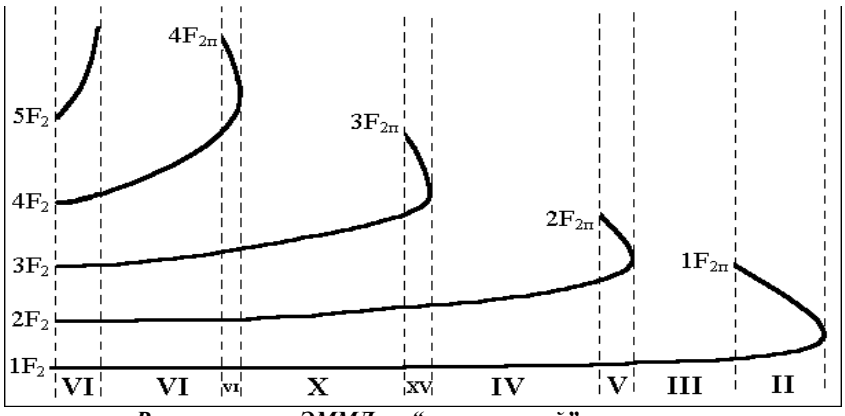
Таблица 3

Выявленные эмпирические модели многолучевости

M	***N***	***Моды для односкачковых***	***Моды для двухскачковых***	***Расположение (схематично) треков мод на ионограмме НЗИ***
I	1	1E (1Es)	2E (2Es)	
II	2	$1F_2$, $1F_{2п}$	$2F_2$, $2F_{2п}$	
III	1	$1F_2$	$2F_2$	
IV	2	$1F_2$, $2F_2$	$2F_2$, $3F_2$	
V	3	$1F_2$, $2F_2$, $2F_{2п}$	$2F_2$, $3F_2$, $3F_{2п}$	
VI	3-8	$1F_2$, $2F_2$, $3F_2$, $4F_2$, $4F_{2п}$, 1E, и др.	$2F_2$, $3F_2$, $4F_2$, $5F_2$, $5F_{2п}$, 2E, и др.	

Окончание табл. 3

M	N	Моды для односкачковых	Моды для двухскачковых	Расположение (схематично) треков мод на ионограмме НЗИ
VII	3	$1F_2$, $1F_{2пO}$, $1F_{2пX}$	$2F_2$, $2F_{2пO}$, $2F_{2пX}$	
VIII	3	$1F_2$, $2F_{2O}$, $2F_{2X}$	$2F_2$, $3F_{2O}$, $3F_{2X}$	
IX	3	$1F_2$, комб., $2F_2$	$2F_2$, комб., $3F_2$	
X	3	$1F_2$, $2F_2$, $3F_2$	$2F_2$, $3F_2$, $4F_2$	
XI	1	$2F_2$	$3F_2$	
XII	1	$1F_{2п}$	$2F_{2п}$	
XIII	2	$2F_2$, $2F_{2п}$	$3F_2$, $3F_{2п}$	
XIV	2	$2F_2$, $3F_2$	$3F_2$, $4F_2$	
XV	4	$1F_2$, $2F_2$, $3F_2$, $3F_{2п}$	$2F_2$, $3F_2$, $4F_2$, $4F_{2п}$	



Расположение ЭММЛ на "классической" ионограмме

К ЭММЛ VI были отнесены случаи с любыми сочетаниями мод, если мод три и более, и находящиеся по частоте до X модели. Частость каждого отдельного случая невелика, поэтому они объединены в одну ЭММЛ. Чаще всего, в VI модели было 4 или 5 мод. На одной ионограмме могло быть несколько диапазонов многолучевости, отнесенных к VI модели, и отличавшихся числом мод. На рисунке VI модели пунктирными линиями показаны комбинированные моды.

Во всех моделях, кроме VII и VIII, обыкновенный и необыкновенный магнитоионные компоненты луча не разделяются (не разрешаются). Поэтому, например, запись $1F_2$ подразумевает оба магнитоионных компонента O и X.

Для ЭММЛ VII и VIII, образованных в результате магнитоионного расщепления мод $1F_{2п}$ и $2F_2$ соответственно, магнитоионные компоненты луча обозначены нижними индексами: $1F_{2пO}$, $1F_{2пX}$ и $2F_{2O}$, $2F_{2X}$.

ЭММЛ IX образована при участии комбинированной моды.

ЭММЛ XI, XII, XIII, XIV возникают при отсутствии нижнего луча $1F_2$ (или он очень короткий), но при условии наличия верхнего луча $1F_{2п}$.

3. Частости моделей многолучевости. Была исследована частость ЭММЛ, причем двумя способами. Сначала для всех выявленных ЭММЛ был подсчитан процент ионограмм, на которых присутствует эта модель, на основе результатов сделан вывод о наиболее вероятных ЭММЛ – встречающиеся на более чем 20 % ионограмм для всех трех трасс. Это ЭММЛ II, III, IV, VI, X. Для трассы 4-1 этому условию удовлетворяют также ЭММЛ V и XV.

Для наиболее частых ЭММЛ II, III, IV, VI, X частость была подсчитана также следующим способов: если ЭММЛ существует на обеих соседних ионограммах (при условии, что между этими соседними ионограммами не больше 1 часа), то считается, что ЭММЛ существует все время от начала первой ионограммы до конца второй. Подчеркнем, что это не процент ионограмм, а процент времени. Так подсчитывать частость ЭММЛ точнее, так как в различных экспериментах НЗИ была разная периодичность съема ионограмм из-за разницы в наборе принимаемых

радиолиний. В большинстве случаев, однако, снималась 1 ионограмма одной радиолинии раз в 15 минут. Поэтому, и частости для ЭММЛ II, III, IV, VI, X подсчитанные двумя указанными способами получились близкими. Итак, наиболее вероятными (частыми) моделями являются II, III, IV, VI, X.

4. Частотные границы моделей многолучевости. В табл.4 приведены статистические данные (математические ожидания M и СКО σ) о частотных границах ЭММЛ в относительных частотах (т.е. частотах, нормированных относительно максимальной наблюдаемой). На рис.2 показаны вариации частотных границ ЭММЛ в течение одних суток для радиолинии 2-1. В последней колонке таблицы 4 приведены диапазоны, занимаемые моделями в относительных частотах. Заметим, что прохождение КВ-радиоволн обычно начинается с 0.3-0.4, и весь диапазон прохождения составляет 0.6-0.7.

Таблица 4

Частотные границы ЭММЛ в относительных частотах

Радиолиния	Модель	f_0 / МНЧ		f_1 / МНЧ		$M(f_1$ / МНЧ) – $M(f_0$ / МНЧ)
		M	σ	M	σ	
2-1	II	0.94	0.11	1.00	0.01	0.06
	III	0.78	0.16	0.94	0.11	0.16
	IV	0.62	0.09	0.78	0.16	0.16
	VI	0.36	0.06	0.53	0.08	0.17
	X	0.54	0.08	0.62	0.09	0.08
3-1	II	0.89	0.09	0.95	0.02	0.06
	III	0.74	0.12	0.89	0.09	0.15
	IV	0.51	0.07	0.74	0.12	0.23
	VI	0.31	0.07	0.38	0.05	0.07
	X	0.38	0.05	0.51	0.07	0.13
4-1	II	0.76	0.10	0.97	0.04	0.21
	III	0.69	0.09	0.76	0.10	0.07
	IV	0.54	0.13	0.66	0.08	0.12
	VI	0.24	0.04	0.43	0.04	0.19
	X	0.43	0.04	0.52	0.09	0.09

Сравнительно высокое СКО (0.13-0.16) характерно для границы между III и IV моделями на р/л 2-1, 3-1; это объясняется тем, что между этими моделями иногда может существовать модель V.

Для границы между II и III моделями характерно также сравнительно высокое СКО (0.09-0.11), что обусловлено сильными вариациями диапазона прохождения верхнего луча $1F_{2n}$, который более чувствителен к ионосферным возмущениям, чем нижний луч $1F_2$.

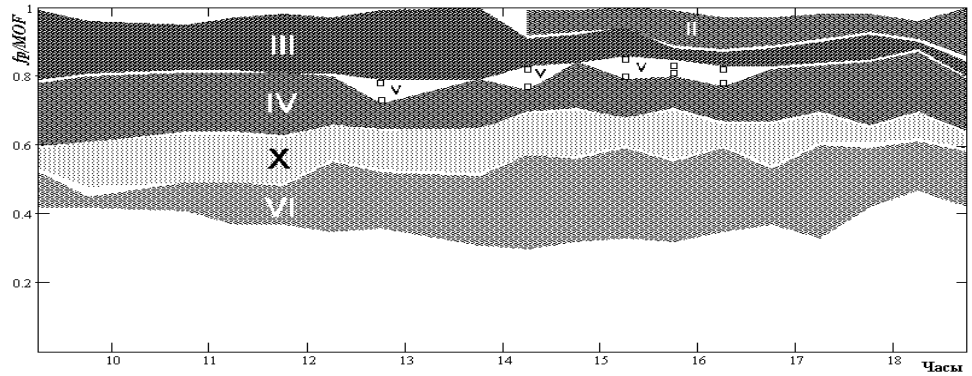


Рис. 2. Частотные границы ЭММЛ, 01.03.2001, радиолиния 2-1

Частотные границы (в относительных частотах) основных моделей достаточно устойчивы, о чем говорят малые значения СКО частотных границ для ЭММЛ II, III, IV, VI, X. Устойчивость их иллюстрирует и пример суточного хода границ (рис.2).

5. Межмодовые задержки. Для моделей II, IV, X были исследованы межмодовые задержки (ММЗ). ЭММЛ III и VI из этого исследования исключены потому что модель III – однолучевая, а модель VI непригодна для детального анализа, так как введена для учета случаев с числом мод три и более и для различных редких комбинаций более чем трех мод.

ММЗ вычислялись относительно минимальной на текущей частоте задержки. Статистика ММЗ собиралась отдельно для каждой радиолинии и ЭММЛ. Математические ожидания межмодовых задержек $\Delta\tau$ и их СКО представлены в табл.5. На рис.3 приведены суточные вариации межмодовых задержек для моделей II, IV, X на каждой из радиолиний 2-1, 3-1, 4-1. На рисунках буквой N обозначено число ионограмм, по которому получен данный суточный ход. Для двухмодовых моделей II, IV на рисунках приведено по одному графику, а в таблице 5 по одной межмодовой задержке $\Delta\tau_1$; для трехмодовой модели X приведено по два графика и по две межмодовые задержки $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ (это задержки второй и третей мод относительно первой).

В таблице 5 приведены как данные для дня и ночи, так интегральные данные. Дневным временем для радиолиний 2-1, 3-1, 4-1 считалось, соответственно 6-18 ч, 10-21 ч, 9-19 ч по московскому времени (в приемном пункте), ночным – все остальное время суток. Интегральные данные в таблице 5 ближе к дневным т.к. число ионограмм, на которых наблюдается каждая ЭММЛ днем в несколько раз больше, чем ночью (см. число N на соответствующих диаграммах).

Таблица 5

Статистика межмодовых задержек

р/л	М	Межмодовые задержки, мс											
		День				Ночь				Общ.			
		$\Delta\tau_1$	$\sigma(\Delta\tau_1)$	$\Delta\tau_2$	$\sigma(\Delta\tau_2)$	$\Delta\tau_1$	$\sigma(\Delta\tau_1)$	$\Delta\tau_2$	$\sigma(\Delta\tau_2)$	$\Delta\tau_1$	$\sigma(\Delta\tau_1)$	$\Delta\tau_2$	$\sigma(\Delta\tau_2)$
2-1	II	0.57	0.20	-	-	0.62	0.22	-	-	0.58	0.21	-	-
	IV	0.51	0.12	-	-	0.55	0.19	-	-	0.51	0.13	-	-
	X	0.41	0.11	1.07	0.22	0.39	0.15	1.04	0.27	0.41	0.12	1.06	0.23
3-1	II	0.52	0.15	-	-	0.57	0.16	-	-	0.54	0.16	-	-
	IV	0.48	0.13	-	-	0.62	0.16	-	-	0.52	0.15	-	-
	X	0.42	0.09	1.21	0.22	0.49	0.11	1.34	0.22	0.43	0.10	1.26	0.23
4-1	II	0.53	0.16	-	-	0.55	0.15	-	-	0.54	0.16	-	-
	IV	0.51	0.12	-	-	0.60	0.16	-	-	0.54	0.14	-	-
	X	0.40	0.08	1.19	0.17	0.42	0.10	1.12	0.18	0.40	0.08	1.19	0.18

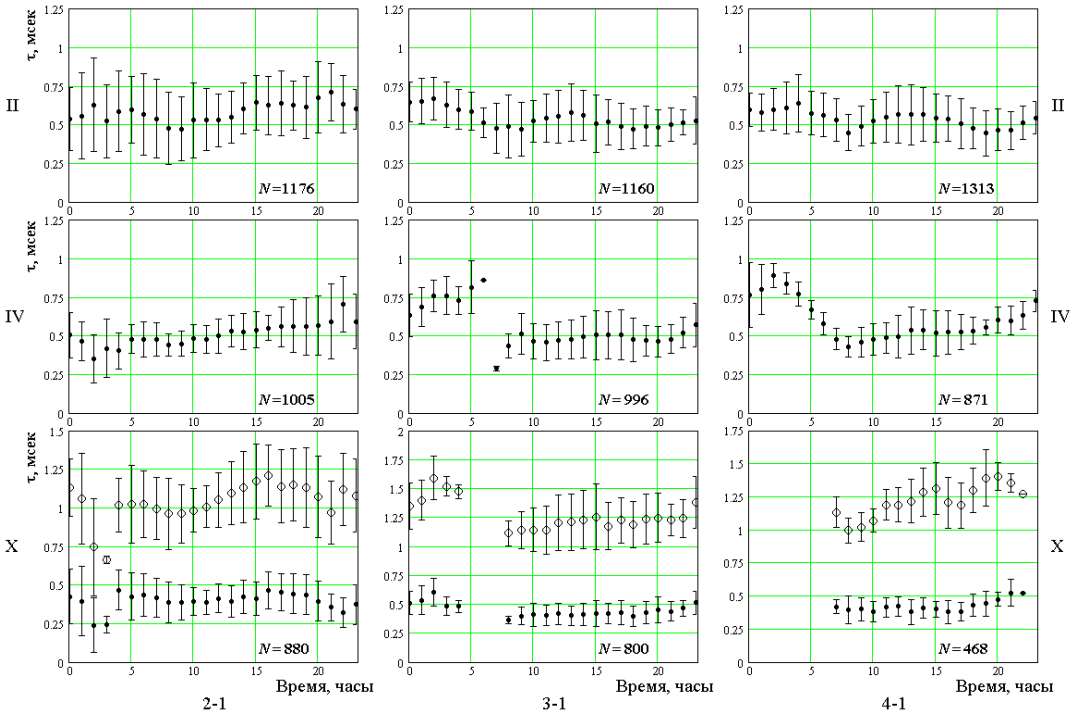


Рис. 3. Суточные вариации межмодовых задержек (по часам)

Заключение. Представлены результаты исследования трех среднеширотных ионосферных радиолиний: выявленные ЭММЛ, а для наиболее вероятных ЭММЛ – статистика вариаций относительных частотных границ и межмодовых задержек. Результаты по сути являются размеченным датасетом что позволяет применять их для тренировки статистических моделей методами теории обучения машин, с целью построения эмпирических моделей ионосферы, а также для синтеза искусственных ионограмм.

Задачей дальнейших исследований также является внедрение построенных ионосферных моделей в систему комплексного имитационного моделирования загоризонтных радиолокационных станций для отработки алгоритмов их адаптации к геофизической обстановке [11,12].

Список литературы

1. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
2. Филипп Н.Д., Блаунштейн Н.Ш., Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Урядов В.П. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: Штиинца, 1991. 286 с.
3. Хмельницкий Е.А. Оценка реальной помехозащищенности приема сигналов в КВ диапазоне. М.: Связь, 1975. 232 с.
4. Щирый А.О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолиний: Дис. на соиск. учен. степ. кандидата технических наук: Спец. 05.12.04; [Место защиты: Санкт-Петербургский гос. университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича]. Защищена 24.05.2007; Утв. 14.12.2007; 04200722350; Шифр РГБ 61:07-5/2691. Йошкар-Ола, 2007. 199 с.
5. Щирый А.О. Гибкая перестройка ионограмм наклонного радиозондирования ионосферы в процессе вторичной обработки // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2011, № 14. С. 138-140.
6. Щирый А.О. Развитие средств автоматизации наземного радиозондирования ионосферы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2014. Т.14. №5. С. 170-173.
7. Щирый А.О. Архитектура программной части аппаратно-программного комплекса дистанционного наземного радиозондирования ионосферы // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2015. №18. С.144-152.

8. Щирый А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Журнал радиоэлектроники. 2022. №10. DOI: 10.30898/1684-1719.2022.10.4.

9. Щирый А.О. Проблемно-ориентированный аппаратно-программный комплекс оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2023. Вып.1. С. 297-315.

10. Колчев А.А., Шумаев В.В., Щирый А.О. Измерительный комплекс для исследования эффектов многолучевого ионосферного распространения коротких волн // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008, Т.51, № 12. С. 73-78.

11. Щирый А.О. Совместное использование машинного обучения и комплексного имитационного моделирования в интересах адаптации загоризонтных РЛС к геофизической обстановке // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве – 2021: Междунар. форум: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2021. С. 284-285.

12. Щирый А.О. Перспективы применения методов теории обучения машин для оперативного измерения характеристик многолучевости при ионосферном распространения коротких радиоволн в интересах адаптации загоризонтных РЛС к геофизической обстановке // Труды VIII Всеросс. научно-технической конф. «Дальняя радиолокация на службе Отечеству». М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2022. С. 133-144.

13. Колчев А.А., Шумаев В.В., Щирый А.О. Наиболее вероятные модели многолучевости при распространении коротких волн на магистральных среднеширотных радиолиниях // Информационные технологии моделирования и управления. 2007, № 1 (35). С. 70-76.

14. Shiriy A.O. HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. 5. 2002. P.365-369.

15. Колчев А.А., Щирый А.О., Недопекин А.Е. Математические модели и методики измерения АЧХ многолучевых ионосферных коротковолновых радиолиний: монография / Мар. гос. ун-т. Йошкар-Ола, 2013. 147 с.

Щирый Андрей Олегович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, andreyschiriy@gmail.com, Россия, Москва, ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН) им. Н.В. Пушкова, Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт" (НИУ МЭИ)

CREATING A DATASET BASED ON EMPIRICAL MODELS OF MULTIPATH PROPAGATION OF DECAMETER RADIO WAVES IN THE IONOSPHERE

A.O. Schiriy

The results of processing more than 5,500 ionograms of oblique sounding of mid-latitude ionospheric radio lines with Frequency-Modulated Continuous Wave signals are presented, during which empirical multipath models were identified – combinations of certain types of ionospheric propagation modes of decameter radio waves: identified empirical multipath models, and for the most probable models – statistics of variations in relative frequency boundaries and intermode delays. The obtained data can be used as a training dataset for training statistical models by machine learning algorithms.

Key words: ionosphere, multipath propagation of short radio waves, oblique radiosonding, ionogram.

Schiriy Andrey Olegovich, candidate of technical sciences, docent, senior scientist, andreyschiriy@gmail.com, Moscow, Russia, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU MEI)

УДК 004.052.44; 004.054
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-31-32

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ «ЭЛЬБРУС» ДЛЯ БЫСТРОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ОШИБОК

Г.Е. Панамарев, А.В. Ефремов

В статье рассмотрен потенциал аппаратно-программной платформы «Эльбрус», реализованной на архитектуре E2K. Проанализированы такие ключевые особенности архитектуры E2K, как идеи явного управления параллелизмом операций с помощью компилятора и возможность запуска программ в режиме безопасных вычислений. Представлены результаты исследований по разработке системы динамического тестирования (испытательного стенда) для обнаружения скрытых ошибок программного обеспечения на основе уникальных особенностей режима безопасных вычислений архитектуры E2K.

Ключевые слова: архитектура E2K, режим безопасных вычислений, процессор «Эльбрус», портирование программного обеспечения, верификация программного обеспечения, динамическое тестирование.

В ввиду активизации импотрозамещения в России и перехода на отечественное программное обеспечение вопрос обнаружения в нем скрытых ошибок, уязвимостей является достаточно актуальным [1-4]. Ряд отечественных ученых раскрывают в своих работах отдельные аспекты в области реализации режима безопасных вычислений для обнаружения уязвимостей в программном обеспечении и автоматизированных системах [5-8], портирования [9-12], разработке безопасного системного программного обеспечения [13-18], исследуя заявленную проблематику в контексте использования аппаратно-программной платформы «Эльбрус».

На сегодняшний день лидерами на мировом рынке процессоров являются крупные зарубежные производители: *Intel* и *AMD*. Процессоры этих компаний созданы на архитектуре *x86_64,* их отличает высокая производительность и быстродействие. Однако, в погоне за быстродействием своей продукции данные разработчики осознанно оставляют бреши в безопасности, поскольку недопущение уязвимостей в безопасности при производстве процессоров неминуемо снизит их быстродействие из-за значительного усложнения вычислений. Кроме того, под предлогом повышения эффективности, оперативности технического обслуживания, на этапе проектирования и изготовлении процессоров, компании беспрепятственно вносят в них аппаратные закладки с недекларированными возможностями. В связи с этим особый интерес представляют процессоры, построенные по альтернативной архитектуре *E2K*, например, семейство процессоров «Эльбрус».

В данный момент актуальным процессором архитектуры *E2K* является процессор «Эльбрус-8С». Он относится к четвертому поколению процессоров «Эльбрус», имеет восемь ядер с тактовой частотой 1300 МГц, 16 МВ кэша третьего уровня и способен работать с четырьмя каналами оперативной памяти. Процессор изготовлен по технологическому процессу 28 нм и поддерживает работу в многопроцессорных системах (до четырех штук). Сравнение данного процессора с некоторыми аналогами представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики процессоров «Эльбрус» и «Intel»

Характеристика \ Процессор	Эльбрус-4С	Эльбрус-8С	Intel Core i3-3110M	Intel Xeon E5-2609 v3
Микроархитектура	Эльбрус пок. 3	Эльбрус пок. 4	Ivy Bridge	Haswell
Тактовая частота	800 МГц	1,3 ГГц	2,4 ГГц	1,9 ГГц
Пиковая производительность, ГФлопс	25	125	38,4	182,4
Скалярных/векторных операций за такт	23/8	25/12	6/8	8/16
Число ядер	4	8	2	6
Кэш-память L3, Mb	8	16	3,5	15
Количество каналов памяти	3	4	2	4
Пропускная способность каналов памяти, ГБ/с	38,4	51,2	25,6	51,2
Многопроцессорность	До 4	Нет	До 4	До 2
Технологический процесс, нм	65	28	22	22
Тепловыделение, Вт	45	70	35	85

Основными преимуществами процессора «Эльбрус-8С» относительно аналогов является встроенная аппаратная поддержка безопасных вычислений, что гарантирует защиту от ряда угроз нарушения нормального функционирования пользовательских и системных программ. Архитектура *E2K* процессора «Эльбрус» предполагает реализацию обращений к памяти через дескрипторы, которые защищены от изменения и формирования нового дескриптора из частей других дескрипторов. Дескриптор – это структура размером 128 бит, которая реализовывается исключительно на аппаратном уровне, а при попытке создания дескриптора на программном уровне будет вызвано аппаратное прерывание. Организация дескриптора основана на следующих элементах: указатель на область в памяти, границы выделенной области памяти и теги контроля доступа. Схематичное отличие дескриптора от указателя продемонстрировано на рис. 1.

При обращении в память арифметико-логического устройства процессора «Эльбрус» проверяются внешние теги дескриптора. При несоответствии прав доступа к массиву или несоответствия индекса адресуемого элемента с размером массива генерируется исключение и происходит завершение процесса. Данная технология позволяет защититься от угроз, использующих ошибку переполнения буфера и выхода за границы массива. Использование незащищенного режима процессора «Эльбрус» также имеет свои особенности, которые повышают надежность системы. Стек связующей информации (цепочка адресов возврата функций) отделен от стека пользовательских данных и недоступен для вирусных атак, работающих по принципу подмены адреса возврата.

Данные особенности процессора «Эльбрус», повышающие безопасность использования ПЭВМ на архитектуре *E2K*, позволяют догнать и превзойти в плане производительности и масштабируемости конкурирующие суперскалярные *x86_64* процессоры *Intel* и *AMD*. Немаловажную роль в этом играет то, что процессоры «Эльбрус» не подвержены атакам, направленным на использование ошибок спекулятивного вычисления, найденным в процессорах *x86_64* и *ARM*. Аппаратные уязвимости процессоров архитектур *x86_64* такие, как *Meltdown (CVE-2017-5754), Spectre (CVE-2017-5753, CVE-2017-5715), RIDL (CVE-2018-12126, CVE-2018-12130), Fallout (CVE-2018-12127), ZombieLoad (CVE-2019-11091)* и им подобные были устранены на уровне операционных систем, однако эти меры снижают производительность на данном аппаратном и программном обеспечении на 30-80 %. У процессоров «Эльбрус» данная проблема была решена изначально, на уровне планирования архитектуры. Это позволяет утверждать, что разработка программных продуктов под данную архитектуру позволяет избегать создания заплаток, снижающих производительность.

Рис. 1. Отличие дескриптора от указателя

Для оценки производительности аппаратно-программного комплекса «Эльбрус-801» на базе процессора «Эльбрус-8С» с установленной операционной системой *Astra Linux Special Edition* «Ленинград» и настройки режима безопасных вычислений программ был разработан испытательный стенд, который позволяет провести тестирование программного кода на языках Си/Си++. Макет испытательного стенда изображен на рис. 2.

Рис. 2. Макет испытательного стенда

Испытательный стенд представляет собой две рабочие станции «Эльбрус 801-РС» и рабочую станцию на базе процессора «*Intel*», соединенные в сеть с помощью коммутатора *Microtik* (табл. 2). Стенд должен производить верификацию и отладку программного обеспечения для нахождения скрытых ошибок в программах, написанных на языках Си/С++.

Таблица 2

Список оборудования, входящего в состав испытательного стенда

Наименование	Количество
Рабочая станция ПЭВМ ОН «Эльбрус-801»	2
Рабочая станция на базе процессора Intel	1
Сетевой коммутатор Microtik CRS328-24P-4S-RM	1

Верификация исходного кода проводится путем сборки программного обеспечения в режим безопасных вычислений процессоров линейки «Эльбрус» и его дальнейшей отладки с использованием сценариев работы программы. В случае, если все тестовые возможные сценарии использования программы отработали без ошибок, то она считается верифицированной. В противном случае необходимо вносить исправления в те части исходного кода программы, которые приводят к сбоям в работе.

Принцип работы испытательного стенда основан на использовании режима безопасных вычислений процессора «Эльбрус», который накладывает на программный код некоторые ограничения, связанные с запретом использования легальных, но небезопасных конструкций языка Си.

Наличие следующих конструкций в программном коде при исполнении в безопасном режиме приведет к аппаратному прерыванию:

1. Преобразование дескрипторов;
2. Отсутствие выравнивания дескрипторов на 16;
3. Отсутствие инициализации у переменных;
4. Отсутствие команды *return* в функциях;
5. Обращение к элементу массива по индексу, превышающему размер массива;
6. Особенности реализации некоторых библиотек.

Рассмотрим несколько примеров обнаружения недопустимых конструкций на языке Си при портировании программного обеспечения в режим безопасных вычислений на базе процессора «Эльбрус».

А. Ошибки, возникающие при работе с массивами. В программе «калькулятор» названия арифметических операций хранятся в многомерном массиве символов, представляющем шесть символьных строк. При вводе несуществующего номера операции, числа 7, в обычном режиме исполнения программы ошибки не возникает, и название выбранной арифметической операции выводится некорректно, как показано на рис. 3.

```
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ lcc -mptr64 ./calcul.
c
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ ./a.out
Выберите операцию:
 1 Сложение
 2 Вычитание
 3 Умножение
 4 Деление
 5 Степень
 6 Факториал
:7
Выбрана операция:(null)
 Введите операнд №1
```

Рис. 3. Некорректный выбор операции в 64-битном режиме

В режиме безопасных вычислений при аналогичном некорректном вводе операции возникает ошибка сегментирования вследствие выхода за границы массива с названиями операций, как показано на рис. 4.

```
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ lcc -mptr128 ./calcul
.c
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ ./a.out
Выберите операцию:
 1 Сложение
 2 Вычитание
 3 Умножение
 4 Деление
 5 Степень
 6 Факториал
:7
Ошибка сегментирования
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$
```

Рис. 4. Некорректный выбор операции в 128-битном режиме

Фрагмент кода с ошибкой выхода за границы массива представлен на рис. 5.

```
int  selectOperation()
{
   char enteredNumber;
   scanf("\n %c", &enteredNumber);
   printf("Выбрана операция:%s", operationNames[convertToDigit(enteredNumber)-1]);
```

Рис. 5. Фрагмент кода с ошибкой выхода за границы массива

Для предотвращения данной ошибки необходимо написать функцию, проверяющую выход индекса за границы массива при обращении к его элементу. Поскольку нумерация в массиве начинается с 0, то допустимый предел индексов находится в интервале *[0, N-1]*, где *N* – количество элементов массива. Реализация функции проверки выхода за границы массива представлена на рис. 6. Количество элементов массива определяется как отношение размера всего массива к размеру указателя (в данном случае 16 байт).

```
int checkArrayIndex(int index )
{
   int sizeType = sizeof(char*);
   int size = sizeof(operationNames) / sizeType;
   if(index > -1 && index < size)
     return 0;
     else return -1;
}

int  selectOperation()
{
   char enteredNumber;
   scanf("\n %c", &enteredNumber);

   if(checkDigital(enteredNumber)==-1)
   {
       printf("Введен некорректный номер операции! \n");
       return -1;

   }

    if(checkArrayIndex(convertToDigit(enteredNumber))==-1)
   {
       printf("Операции с таким номером не существует! \n");
       return -1;

   }
```

Рис. 6. Реализация и вызов функции checkArrayIndex

После перекомпиляции кода с исправленной ошибкой в режим безопасных вычислений не возникает аппаратного прерывания в связи с недопустимым индексом массива и выводится соответствующее сообщение, как показано на рис. 7.

```
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ lcc -mptr128 ./calcul
.c
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ ./a.out
Выберите операцию:
 1 Сложение
 2 Вычитание
 3 Умножение
 4 Деление
 5 Степень
 6 Факториал
:7
Операции с таким номером не существует!
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$
```

Рис. 7. Обработка ошибки ввода неверного индекса в режиме безопасных вычислений архитектуры E2K

Б. Ошибки, возникающие при модификации указателей. Ошибка возникает при необходимости «сместить» указатель на выделенную память на несколько ячеек вправо или влево. Для этого текущий указатель приводят к числовому адресу, затем выполняют арифметическую операцию и результат приводят к нужному типу указателя. Указатель содержит в себе только базовый адрес на ячейку памяти. Дескриптор помимо базового адреса содержит смещение от базового адреса и размер выделенной памяти.

Таким образом, при приведении дескриптора к числовому типу получается указатель, а преобразовать указатель в дескриптор невозможно из-за отсутствия в указателе информации о смещении и размере выделенной памяти (размер указателя – 8 байт, размер дескриптора – 16 байт). Это является причиной возникновения ошибки модификации указателей в режиме безопасных вычислений. Данная ошибка часто возникает при обращении к определенному элементу массива с помощью указателя. Для этого к указателю на первый элемент массива прибавляют соответствующее число для смещения указателя вправо к соответствующей ячейке памяти с необходимым значением. На рис. 8 представлен код на языке Си, демонстрирующий обращение к элементам массива с помощью преобразования указателя в числовой тип и обратно в указатель.

```c
#include<stdio.h>

int main()
{
   int array[10] = {2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029};

   int index =0;
   printf("Введите номер элемента массива:");
   scanf("%d",&index);
   printf("%d", index);
   getElementByDescriptor(array, index);

   return 0;
}

int getElementByDescriptor(int array[], int index)
{
     unsigned long* addr = array;

     unsigned long*  new_addr = (void* )((long long)addr + 4 *index);
     printf("Элемент по индексу %d = %d", index, *new_addr );
    return 0;
}
```

Рис. 8. Обращение к элементу массива через преобразования с указателем

Результат работы программы в обычном 64-битном режиме представлен на рис. 9.

```
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ lcc -mptr64  modifica
te_descriptor.c
lcc: "modificate_descriptor.c", строка 11: предупреждение #223: функция
          "getElementByDescriptor" объявлена неявно
          [-Wimplicit-function-declaration]
     getElementByDescriptor(array, index);
     ^

lcc: "modificate_descriptor.c", строка 18: предупреждение #3244: значение типа
          "int *" не может быть использовано для инициализации объекта типа
          "unsigned long *" [-Wincompatible-pointer-types]
       unsigned long* addr = array;
                             ^

user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ ./a.out
Введите номер элемента массива:4
4Элемент по индексу 4 = 2024user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок
в ЗРИ$ ./a.out
Введите номер элемента массива:1
1Элемент по индексу 1 = 2021user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок
в ЗРИ$ ./a.out
Введите номер элемента массива:7
7Элемент по индексу 7 = 2027user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок
в ЗРИ$
```

Рис. 9. Результат обращения к элементам массива через преобразования указателя в обычном 64-битном режиме

В режиме безопасных вычислений при обращении к нужному элементу массива с помощью такого способа возникает ошибка недопустимой конструкции вследствие невозможности восстановить из указателя (8 байт) дескриптор (16 байт), как показано на рис. 10.

```
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ lcc -mptr128  modific
ate_descriptor.c
lcc: "modificate_descriptor.c", строка 11: предупреждение #223: функция
          "getElementByDescriptor" объявлена неявно
          [-Wimplicit-function-declaration]
     getElementByDescriptor(array, index);
     ^

lcc: "modificate_descriptor.c", строка 18: предупреждение #3244: значение типа
          "int *" не может быть использовано для инициализации объекта типа
          "unsigned long *" [-Wincompatible-pointer-types]
       unsigned long* addr = array;
                             ^

user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ ./a.out
Введите номер элемента массива:4
Недопустимая инструкция
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ ./a.out
Введите номер элемента массива:1
Недопустимая инструкция
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ ./a.out
Введите номер элемента массива:7
Недопустимая инструкция
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$
```

Рис. 10. Ошибка при обращении к элементам массива через преобразование указателей в режиме безопасных вычислений

Исправленный код с помощью проверки дополнительного условия для обращения к элементам массива через преобразование указателя в режиме безопасных вычислений представлен на рис. 11.

```c
#include<stdio.h>

int main()
{
   int array[10] = {2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029};

   int index =0;
   printf("Введите номер элемента массива:");
   scanf("%d",&index);
   getElementByDescriptor(array, index);

   return 0;
}

int getElementByDescriptor(int array[], int index)
{
     int newIndex = index *100;
     unsigned long*  new_addr;
     unsigned long* addr = array;

     if ((unsigned long)(addr) & (newIndex))
     new_addr = ((char* )addr) + (newIndex - ((unsigned long)(addr) & (newIndex))) ;
     printf("Элемент по индексу %d = %d", index, *new_addr );
    return 0;
}
```

Рис. 11. Исправленный код некорректного обращения к элементам массива через указатель

Результат работы программы в режиме безопасных вычислений после исправления ошибки представлен на рис. 12, где по индексам 4, 7 и 1 вызваны элементы массива.

```
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ lcc -mptr128  modificate_
descriptor.c
lcc: "modificate_descriptor.c", строка 10: предупреждение #223: функция
          "getElementByDescriptor" объявлена неявно
          [-Wimplicit-function-declaration]
     getElementByDescriptor(array, index);
     ^

lcc: "modificate_descriptor.c", строка 19: предупреждение #3244: значение типа
          "int *" не может быть использовано для инициализации объекта типа
          "unsigned long *" [-Wincompatible-pointer-types]
       unsigned long* addr = array;
                             ^

lcc: "modificate_descriptor.c", строка 22: предупреждение #3238: значение типа
          "char *" не может быть присвоено объекту типа "unsigned long *"
          [-Wincompatible-pointer-types]
       new_addr = ((char* )addr) + (newIndex - ((unsigned long)(addr) & (newIndex)))
 ;
                ^

user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ ./a.out
Введите номер элемента массива:4
Элемент по индексу 4 = 2024user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ
$ ./a.out
Введите номер элемента массива:1
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$ ./a.out
Введите номер элемента массива:7
Элемент по индексу 7 = 2027user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ
user@localhost:~/serducov/Для поиска скрытых ошибок в ЗРИ$
```

Рис. 12. Результат работы программы в режиме безопасных вычислений после исправления ошибки в коде

Аппаратно-программная платформа «Эльбрус» – уникальная российская (советская) разработка. Под руководством Всеволода Сергеевича Бурцева и при активном участии Бориса Арташесовича Бабаяна была разработана принципиально новая процессорная архитектура, которую Борис Бабаян назвал «постсуперскалярным» подходом, в дальнейшем получившая название VLIW/EPIC. Архитектура VLIW значительно упрощает аппаратную структуру процессора и позволяет выполнять несколько машинных команд за один такт. Однако за счет упрощения архитектуры усложняется процесс компиляции, повышаются требования к программному коду. Программировать под данную архитектуру достаточно сложно из-за того, что для достижения максимальной производительности процессора «Эльбрус» требуется заполнять каждое машинное слово максимальным количеством команд, что для некоторого класса задач может быть проблемой, и при этом усложненный компилятор не прощает ошибок и неточностей в программном коде.

В ходе работы был создан и настроен испытательный стенд на базе ПЭВМ ОН «Эльбрус 801-РС». Он позволяет проводить верификацию и отладку программного обеспечения для нахождения скрытых ошибок в программах, написанных на языках Си/С++, с помощью режима безопасных вычислений архитектуры *E2K* процессора «Эльбрус-8С».

Проведения экспериментальных исследований с помощью *LTP* тестов показало, что стенд корректно работает в обычном и безопасном режиме. Программы, собранные с помощью кросс-компилятора, успешно работают на рабочих станциях с процессором «Эльбрус» и не выдают ошибки при запуске на других архитектурах.

Для проверки стенда в работе при выполнении реальных задач выполнен перенос в безопасный режим вычисления 11 утилит для шифрования.

Важным моментом также является наличие у операционной системы *Astra Linux Special Edition* сертификатов ФСТЭК, ФСБ и Министерства обороны Российской Федерации, из чего следует, что эта система защищена от несанкционированного доступа к внутренней информации с помощью эксплуатации недекларированных возможностей и востребована в организациях, работающих с информацией, относящейся к государственной тайне, в том числе, в Министерстве обороны Российской Федерации.

Список литературы

1. Панамарев Г.Е. Исследование новых подходов к разработке методов обнаружения уязвимостей в автоматизированных системах военного назначения // Военная мысль. 2023. № 3. С. 82-89.

2. Панамарев Г.Е., Малинин К.С., Сердюков П.С., Леонтьев З.Д. Перенос в защищенный режим исполнения «Эльбрус» утилиты для шифрования ccrypt // Сборник статей I научно-технической конференции. Анапа, 2022. – С. 109-118.

3. Русяев Р.М., Нейманзаде М.И., Ермолицкий А.В., Волконский В.Ю. Программно-аппаратные средства выявления ошибок обращения к памяти для архитектуры «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 33-38.

4. Вареница В.В., Марков А.С., Савченко В.В., Цирлов В.Л. Практические аспекты выявления уязвимостей при проведении сертификационных испытаний программных средств защиты информации // Вопросы кибербезопасности. 2021. №5 (45). С. 36-44.

5. Жмурин, А.В. Защищенный режим исполнения (ЗРИ). Режим безопасных вычислений (РБВ). – МЦСТ, 2021. – 46 с.

6. Григорьев П.В., Киржаев Д.А. Анализ недопустимых конструкций на языке Си при портировании программного обеспечения в защищенный режим исполнения на базе процессора «Эльбрус» // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «ИТ-технологии». Анапа. 2023. С. 34-50.

7. Буланый Р.И., Хиков С.П., Малинин К.С. Компиляция и компоновка программ и библиотек в защищенном режиме исполнения семейства «Эльбрус» // Сборник статей I научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «ИТ-технологии». Анапа. 2022. С. 91-100.

8. Кравцунов Е.М., Гисматов А.Р., Антипов А.С., Копылов Н.М. Исследование актуальных уязвимостей cve на платформе «Эльбрус» // Сборник статей конференции «Информатика и вычислительная техника». Анапа. 2019. С. 176-179.

9. Жмурин, А.В. Портирование существующего Си-кода для исполнения на E2K в защищенном режиме. Инструкция для программистов. – МЦСТ, 2020. – 30 с.

10. Струков М.С., Григорьев П.В. Портирование в ЗРИ E2K программы pdfcrack // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «ИТ-технологии». Анапа. 2023. С. 18-26.

11. Кондратьев Б.В., Поддубный М.И., Леонтьев З.Д. Портирование утилиты для вычисления контрольных сумм rhash в защищенный режим исполнения архитектуры E2K // Сборник статей I научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «ИТ-технологии». Анапа. 2022. С. 6-16.

12. Тарара С.А. Анализ необходимости и возможности портирования Си-кода на архитектуру E2K в защищённом режиме исполнения // Информационная безопасность – актуальная проблема современности. Совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов в области информационной безопасности. 2021. № 1(14). С. 235-240.

13. Девянин П.Н., Тележников В.Ю., Хорошилов А.В. Формирование методологии разработки безопасного системного программного обеспечения на примере операционных систем // Труды ИСП РАН. 2021. №5. С. 25-40.

14. Качанов А.Ю., Кузнецов И.В., Хиков С.П., Ведров Е.А Анализ возможности использования системных вызовов ядра Linux в рамках переноса программного обеспечения в защищённый режим исполнения процессоров семейства «Эльбрус» // Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции. Анапа. 2021. С. 61-70.

15. Киржаев Д.А., Струков М.С. Перевод программы для вычисления контрольной суммы файлов SHA в защищенный режим исполнения архитектуры E2K с целью повышения защищенности системы // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции. Анапа. 2023. С. 60-67.

16. Крысов А.Г. Основные ошибки и способы их устранения в процессе портирования программ в защищенный режим исполнения архитектуры E2K // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции. Анапа. 2023. С. 279-286.

17. Поддубный М.И., Качанов А.Ю., Кузнецов И.В., Лобанов А.Г., Хиков С.П. Отладка исходного Си-кода в рамках защищённого режима исполнения архитектуры E2K // Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции. Анапа. 2021. С. 388-394.

18. Поддубный М.И., Качанов А.Ю., Фролов К.В., Хиков С.П., Лобанов А.Г. Повышение защищенности по посредством его перевода в защищенный режим исполнения на примере приложения 7-zip // Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции. Анапа, 2021. С. 395-407.

Панамарев Геннадий Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела, era_otd1@mil.ru, Россия, Анапа, Военный инновационный технополис «ЭРА»,

Ефремов Александр Васильевич, канд. техн. наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела, era_otd1@mil.ru., Россия, Анапа, Военный инновационный технополис «ЭРА»

APPLYING OF THE HARDWARE-SOFTWARE PLATFORM «ELBRUS» TO QUICKLY DETECT HIDDEN ERRORS

G.E. Panamarev, A.V. Efremov

This paper presents prospects of an E2K architecture software-hardware platform "Elbrus". It analyzes such key features of E2K architecture as compiler explicit parallelism control and protected execution mode. Research results on development of a dynamic testing system (testbed) utilizing unique "Elbrus" protected execution mode features for detection of hidden software errors are presented.

Key words: architecture, protected execution mode, "Elbrus" CPU, software porting, software verification and debugging, dynamic testing

Panamarev Gennady Evgenievich, doctor of technical sciences, docent, senior researcher of the research department, Russia, Anapa, Military Innovativ Technopolis «ERA»,

Efremov Aleksandr Vasilievich, candidate of technical sciences, docent, research department, Russia, Anapa, Military Innovativ Technopolis «ERA»

УДК 004.94
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-37-38

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХАНТЕННОГО ФАЗОВОГО ПЕЛЕНГАТОРА

В.В. Пинчуков, А.А. Парамонов

В статье представлено имитационное моделирование трехантенного фазового пеленгатора, в основе которого используется цифровой фазометр. Для реализации модели использовалась среда MATLAB Simulink. Разработанная модель имеет блочную структуру, соответствующую реально используемым элементам и устройствам в радиотехнических системах. Приведено подробное описание модели и ее составных частей, в том числе и цифрового фазометра, чем объясняются результаты моделирования. Представлены зависимости погрешности цифрового фазометра от величины разности фаз сигналов и распределение погрешностей пеленга на цель углов азимута и возвышения в диапазоне однозначности. Объяснены причины роста погрешности в областях, близких к плоскости и перпендикулярно антенной решетке.

Ключевые слова: фазовый пеленгатор, имитационное моделирование, Simulink, цифровой фазометр.

Обеспечение высокого качества работы радиотехнических систем является важной задачей для их разработчиков. Ее решение требует оптимального выбора структуры и параметров системы, способов реализации и алгоритмов работы ее компонентов. Такой выбор может быть выполнен путем экспериментальных исследований различных вариантов реализации радиотехнической системы. Однако разработка и реализация различных вариантов системы приводит, во-первых, к пропорциональному увеличению длительности, а во-вторых, к увеличению стоимости работ по проектированию. Кроме того, проведение сравнительных испытаний также сопровождается большими временными и финансовыми затратами.

Другим, более эффективным путем поиска оптимальных решений при проектировании является проведение моделирования.

Использование моделей вместо реальных радиотехнических систем позволяет прогнозировать работу устройства или системы, легко и быстро изменять конфигурацию, условия и параметры системы. Это дает возможность без значительных финансовых затрат исследовать ее работу в различных вариантах реализации, оптимизировать возможные недостатки до начала производства. Применение же высокопроизводительных вычислительных машин позволяет провести такие исследования в короткие сроки. Таким образом, моделирование является эффективным инструментом исследования и проектирования, обеспечивающим высокую надежность и качество работы радиотехнических систем, а также сокращение сроков и снижение стоимости проектирования и ввода в эксплуатацию.

Для анализа существующих алгоритмов расчета пеленга цели проведено систематизированное обобщение работ в части повышения точности оценки углового положения объектов. В работе [1] предложена коррекция расчетных соотношений для дисперсии результатов пеленгации при коническом сканировании в задаче автосопровож-

дения объектов. Благодаря анализу различных алгоритмов пеленгования для антенных решеток с четным и нечетным числом элементов [2] выяснено, что при фиксированной конфигурации антенной решетки именно алгоритм пеленгования определяет диапазон частот, в котором обеспечиваются однозначные оценки азимута и угла места. Авторами работы [3] предложен способ повышения точности многобазовых пеленгаторов, основанный на исключении результатов измерений с аномальными ошибками в процессе устранения неоднозначностей. Затронут вопрос расчета оптимального размещения группы пеленгаторов для улучшения точности оценки местоположения объекта и покрытия местности [4]. Эти работы демонстрируют, что разработка новых алгоритмов повышения точности пеленгации является актуальной задачей.

Моделирование – метод исследования какого-либо объекта или явления с помощью модели, обеспечивающей близкое к оригиналу поведение в рамках некоторых допущений и приемлемых погрешностей. В общем виде моделирование представляет процесс разработки модели реального объекта или явления и изучение его свойств путем исследования модели.

К основным методам моделирования относятся: физическое, полунатурное, имитационное, аналитическое и математическое.

Физические модели радиотехнических систем в целом представляют собой макеты, реализующие основные принципы и алгоритмы работы системы. Приведем примеры современных физических моделей. В работе [5] разработан и изготовлен двумерный фазовый пеленгатор с четырьмя антеннами с погрешностью не более 0,5°. В [6] проведены разработка и моделирование широкополосной круговой антенной решетки для пеленгационного комплекса БПЛА. Авторы работы [7] разработали многоантенную систему для повышения помехозащищенности систем спутниковой радионавигации на подвижных объектах.

Более подробно остановимся на разработке имитационной модели, под которой понимается логико-математическое описание, отражающее внутреннюю структуру системы, функции ее отдельных элементов и наиболее существенные взаимосвязи между ними [8].

При имитационном моделировании модель воспроизводит алгоритм функционирования системы во времени: имитируются элементарные явления с сохранением их логической структуры и последовательности протекания. За счет этого имитационные модели позволяют достичь высокой степени соответствия при описании функционирования реальной системы. Важной особенностью имитационного моделирования является возможность управления скоростью течения времени: замедлять в случае с быстропротекающими процессами и ускорять для моделирования систем с медленной изменчивостью. Это свойство имеет большое значение при моделировании радиотехнических систем, поскольку радиосигналы являются быстро меняющимися во времени процессами, а их наблюдение при естественном течении времени вызывает ряд затруднений. В актуальных работах [5, 9-11] используется имитационное моделирование в процессе разработки новейших пеленгационных систем. В статье [9] проведено моделирование корреляционного интерферометрического пеленгатора и выявлены основные факторы, влияющие на точность измерения угловых координат. В работе [5] показано, что производительность пеленгатора соответствовала его имитационной модели, а точность оказалась в 1,9 раза хуже, чем предсказывалось теоретически, из-за ошибок измерения фазы. Авторы работ [10, 11] применили технологию виртуальных антенных решеток – особого способа расчета направления прихода электромагнитных волн для повышения точности пассивных пеленгаторов, устанавливаемых на летательных аппаратах.

В работе рассмотрено применение имитационного моделирования, позволяющего разработать модель более точно описывающую реальную систему, чем математическое и аналитическое моделирование, не требуя при этом закупки дополнительного оборудования.

Для разработки модели использовалась графическая среда программирования на основе MATLAB – Simulink. Преимущества Simulink над другими программными продуктами в этой области заключаются в удобстве и естественности для описания типовых блоков физических систем. Интерфейс напоминает конструктор, в котором с помощью различных блоков можно быстро собрать действующую модель любой сложности. При этом пользователю дана возможность создавать собственные блоки и объединять уже существующие в подсистемы, что дает возможность увидеть общую структуру, не загроможденную вторичными блоками. Преимущества такого подхода в полной мере проявляются, когда количество блоков на схеме переваливает за сотню. Кроме того, большинство инструментов также имеют средства для импорта собственных интерфейсов в Simulink.

Основной целью работы является определение зависимости точности пеленгации объекта от углов азимута и возвышения, а также поиск оптимальной области пеленгации для трехантенного фазового пеленгатора. Многоантенная система позволяет: расширить диапазон частот принимаемых сигналов, благодаря большему количеству различных баз; повысить точность измерений за счет устранения статистических случайных шумом, вызванных неоднородностью приема сигнала антеннами; увеличить качество выделения слабого сигнала за счет большего количества обрабатываемых каналов приема [12]. Однако, увеличение количества антенн приводит к повышению затрат и габаритов системы, поэтому важно определять оптимальные параметры антенной решетки для конкретной задачи.

На рис. 1 представлена разработанная модель трехантенного фазового пеленгатора, состоящая из модулей и процессов, соответствующих действительным системам фазовой пеленгации. За основу модели взята схема экспериментального образца радиофотонного пеленгатора [13].

Приведем описание каждого из блоков модели. Генератор сигнала состоит из источника синусоидального сигнала с частотой 433 МГц и конвектора сигнала из библиотеки Simulink в библиотеку RF BlockSet, которая предназначена для моделирования радиосигналов и радиосистем. Сигнал от генератора подается на излучатель, представляющий ненаправленную антенну с усилением в 5 дБ и импедансом в 50 Ом. Для учета распространения излучения в воздушной среде имеется блок потерь, определяемый коэффициентом ослабления в 45 дБ, соответствующего расстоянию до источника излучения в 10 метров. В роли приемника излучения выступает антенная решетка, состоящая из трех антенн, расположенных в узлах прямоугольного треугольника. Для учета фазовых задержек между антеннами введены два блока фазового сдвига относительно опорной антенны, значение фазового сдвига которых определяются исходя из положения источника излучения. Таким образом с антенной решетки выходит три синусоидальных сигнала сдвинутых по фазе друг относительно друг друга, пример которых представлен на рис. 2, где желтый – опорный сигнал, синий – сдвинут на 45°, оранжевый – сдвинут на 150°. Следом размещены усилители с коэффициентом усиления в 14 дБ. К ним подключены два измерителя разности фаз, которые реализованы по схеме циф-

рового фазометра. По измеренным разностям фаз вычисляются азимут и угол возвышения. Полученные данные выгружаются в рабочую область Matlab. Для имитации движения излучателя определен блок перемещения источника, который после пеленга цели останавливает симуляцию, смещает излучатель в следующую точку траектории и запускает симуляцию.

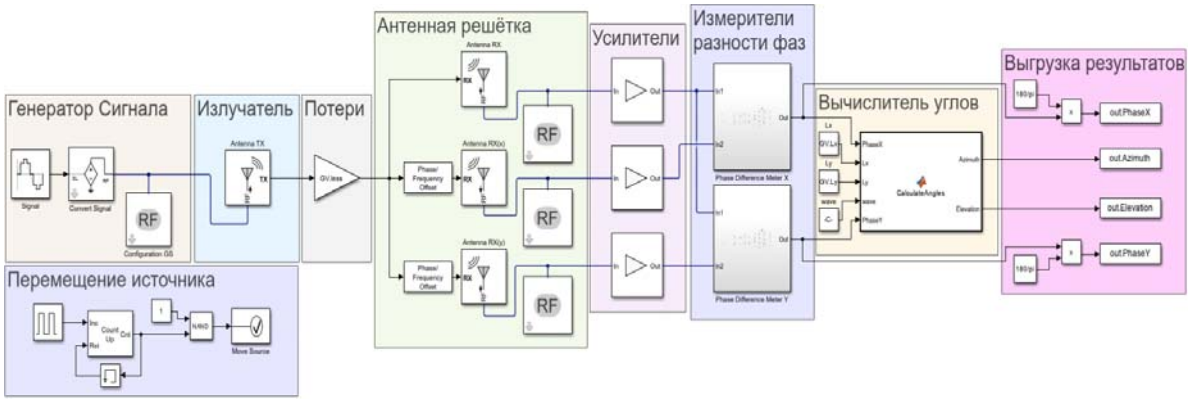


Рис. 1. Модель трехантенного фазового пеленгатора в среде Simulink (цветами обозначены модули системы)

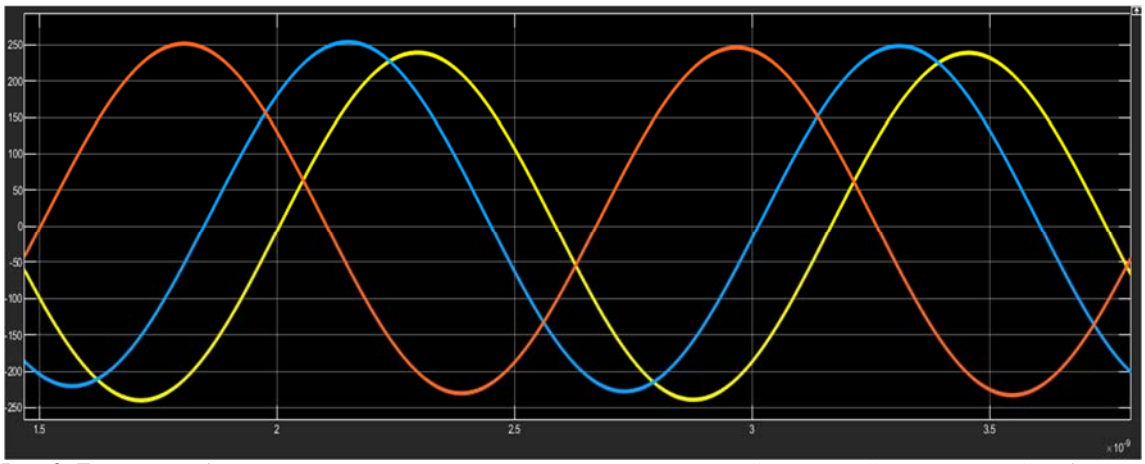


Рис. 2. Три синусоидальных сигнала принимаемых антеннам: желтый – опорный сигнал; синий – сдвинут на 45°; оранжевый – сдвинут на 150°

Приведем подробное описание реализованного измерителя разности фаз, модель которого представлена на рис. 3. На входе стоит сдвиг фазы в 180°, необходимый для смещения динамического диапазона измерений с 0°–360° в -180°–180°, следом – конвектор сигнала, за ним – измеритель среднего значения и сумматор, которые вместе образуют блок вычитания постоянной составляющей сигнала. Переключатель, который преобразует синусоиду в импульсный сигнал. Блок Pulse Converter из двух импульсных сигналов, сдвинутых по фазе, формирует импульсы, соответствующие подъему опорного сигнала и спаду другого сигнала, что представлено на рис. 4 красной линией. Конструкция из генератора счетных импульсов (Counting Impulse Generator) и логического блока «И» (AND) заполняет импульсами смещение между сигналами, что представлено на рис. 4 зеленой линией. Также для дальнейшего расчета измеряется период сигнала, где задействован нижний логический блок «И». Принцип измерения периода счетными импульсами представлен на рис. 5. Следом расположены четыре блока подсчета числа счетных импульсов, импульсов, соответствующих смещениям сигналов, импульсов, соответствующих периоду сигнала; что представлено на рис. 6, где синий линией – счетные импульсы, а желтой – периоды сигнала. Над ними установлен блок Averaging Period Counter, который отвечает за выборку числа отсчетов для усреднения вывода или скорости работы цифрового фазометра.

Разность фаз $\Delta\varphi$ в радианах между сигналами определяется выражением (1):

$$\Delta\varphi = 2\pi\frac{k}{p} - \pi, \tag{1}$$

где k – число счетных импульсов фазовой задержки за время измерения фазометром; p – число счетных импульсов периода сигнала за время измерения фазометром.

Далее рассчитывается среднее значение числа счетных импульсов и периодов сигнала за время измерения. В итоге блок Calculate Diff рассчитывает разность фаз между сигналами. Блок Range Normalization фильтрует случайные выбросы, когда измеренная разность фаз выходит за допустимый диапазон.

Такие блоки, как: Pulse Converter, Averaging Period Counter, вариации блока Counter Diff, вариации блока Calculate и Range Normalization разработаны самостоятельно из элементов библиотек Simulink, т.к. в существующих библиотеках нет готовых решений для реализации работы цифрового фазометра как цельного устройства, так и составных его частей.

В первую очередь в реализованной модели цифрового фазометра измерено среднее квадратическое отклонение (СКО) значений разности фаз (рис. 7). Это необходимо, чтобы оценить влияние погрешности фазометра на

итоговую погрешность пеленгатора. Измерения проводились с шагом каждые 0,5° и последующим усреднением по модулю через каждые 10° с целью наглядной визуализации динамики изменения погрешности, усреднение результатов которой проведено при помощи выражения (2):

$$\Delta\theta = \frac{\Sigma_{\theta}^{\theta+10^{\circ}}|S|}{20}, \text{где } S = \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta x)^2}{n(n-1)}}, \quad (2)$$

где S – СКО для каждого измерения погрешности; Δx – отклонение для одного измерения; n – число измерений погрешности.

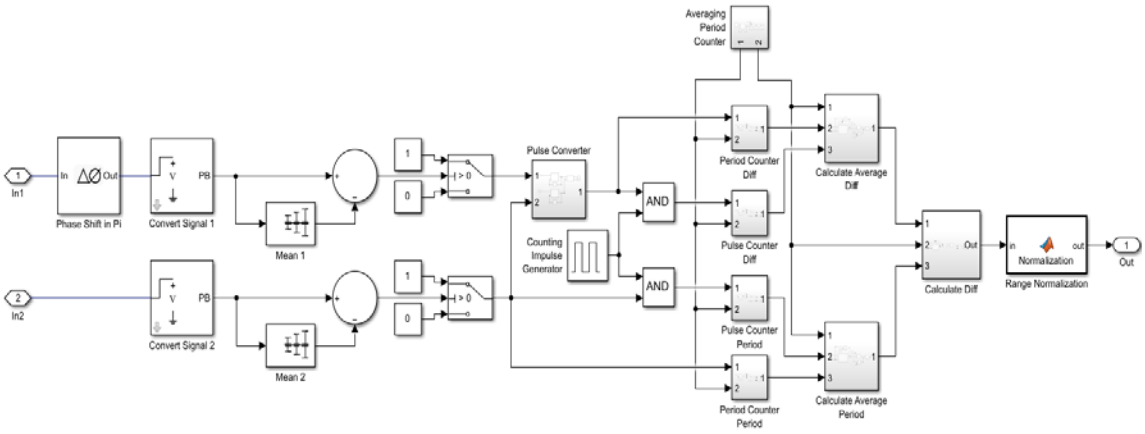


Рис. 3. Модель измерителя разности фаз

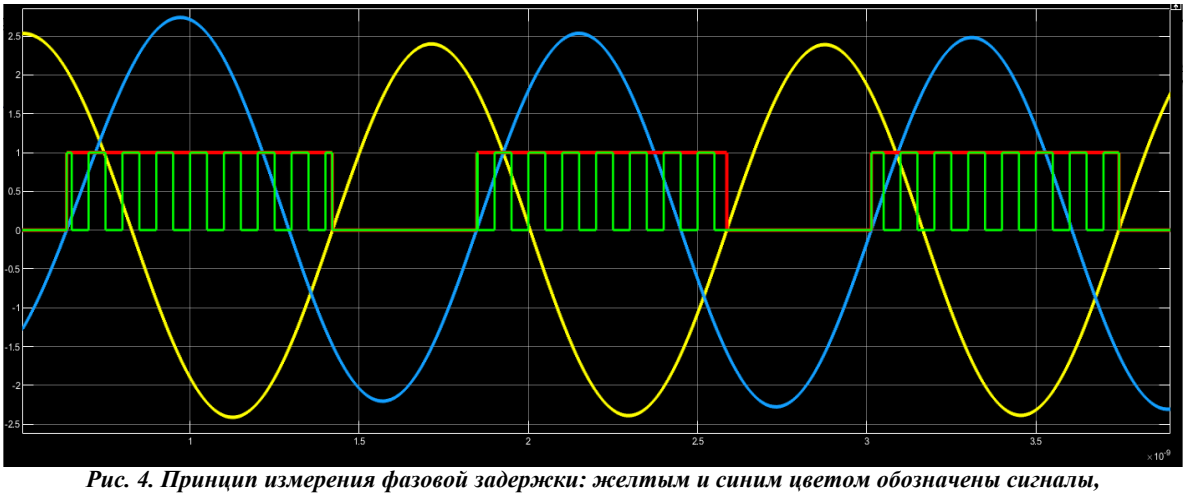


Рис. 4. Принцип измерения фазовой задержки: желтым и синим цветом обозначены сигналы, между которыми измеряется разность фаз; зеленым цветом представлены счетные импульсы

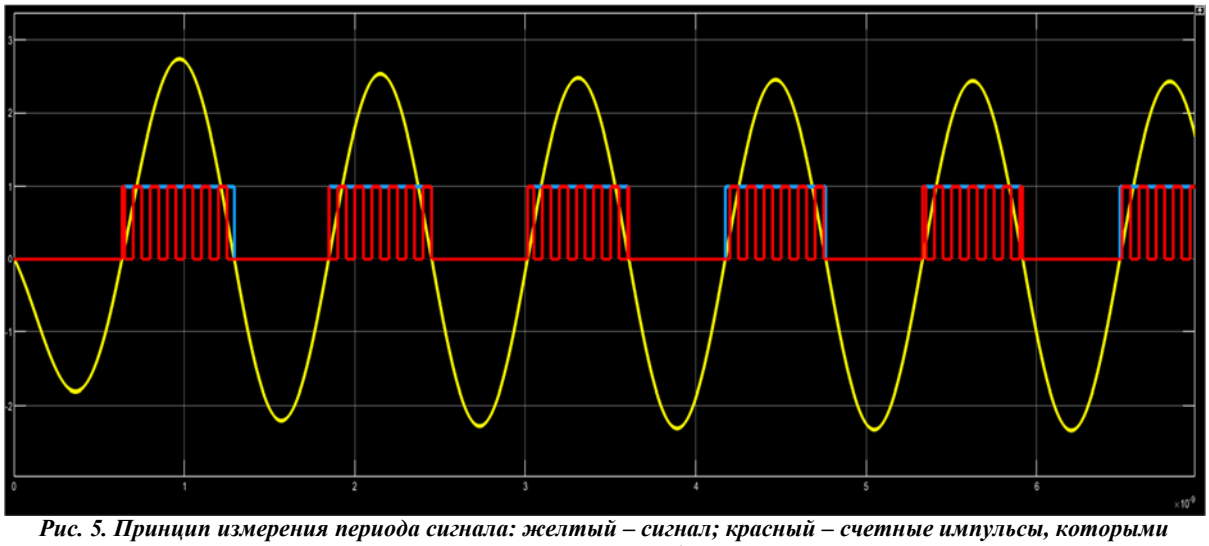


Рис. 5. Принцип измерения периода сигнала: желтый – сигнал; красный – счетные импульсы, которыми измеряется полупериод сигнала

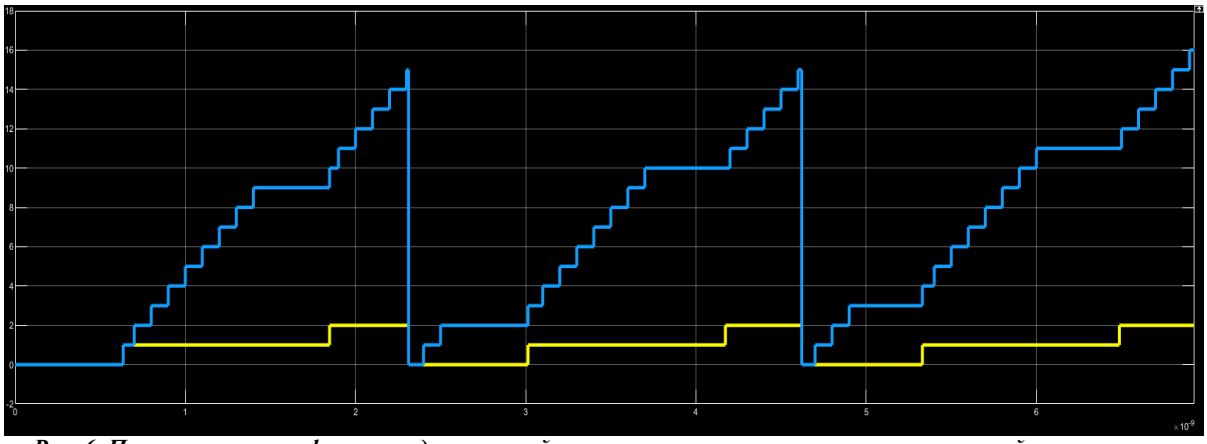


Рис. 6. Принцип расчета фазового сдвига: синий – количество счетных импульсов; желтый – количество периодов сигнала

Как видно из рис. 7, СКО по всему диапазону измерений составило 0,63°, что продемонстрировано красной пунктирной линией.

Значение в 0,63° является достаточно высоким показателем для трех антенной системы пеленгации. Так, например, в работе [9] добились погрешности не более 0,5° только для 8-ми антенной системы, но уже в работе [5] продемонстрировали погрешность не более 0,5° для 4-х антенной системы.

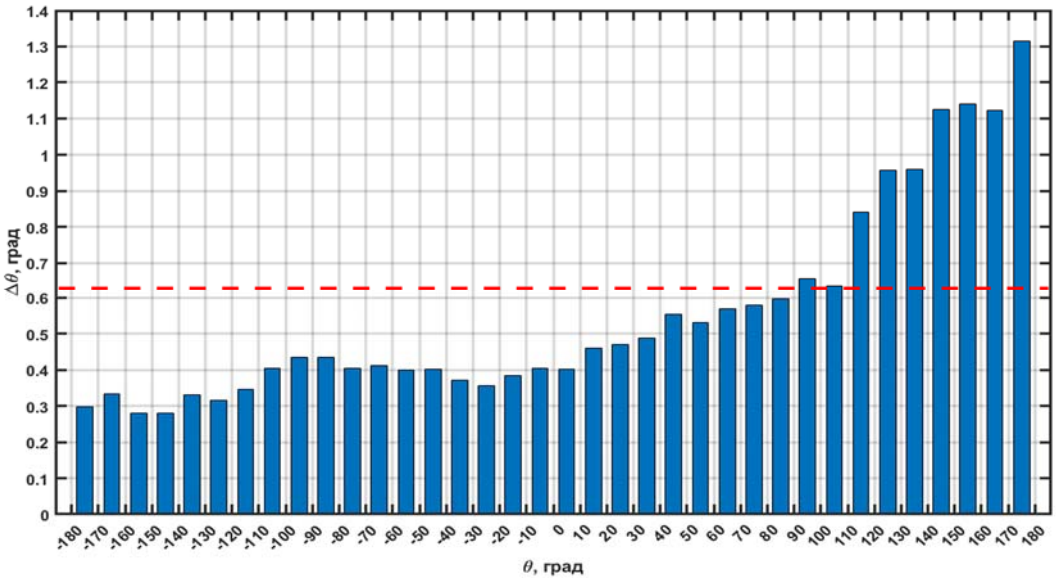


Рис. 7. Среднеквадратическое отклонение измерений разности фаз цифровым фазометром

Для измерения СКО пеленга цели определена область однозначности измерений, которая задается азимутом α от -90° до 90° и углом возвышения β от 0° до 90°, что представлено на рис. 8.

Расчет области однозначности производился по следующей формуле [12]:

$$\alpha_i = \pm arcsin\left[\Delta\vartheta_{\text{одн}}(0{,}5 + i)\right], \qquad (3)$$

где i – принимает значения 0, 1, 2 и т.д., пока аргумент функции не достигнет единицы; $\Delta\vartheta_{\text{одн}}$ – коэффициент однозначности, который для ширины базы в пол длины волны (λ/2) равен $\Delta\vartheta_{\text{одн}} = 2$.

На рис. 9 представлена погрешность измерения азимута цели по диапазону однозначности от 0° до 80° по углу возвышения, т.к. в диапазоне от 80° до 90° идет резкий рост погрешности, при 81° погрешность в некоторых местах превышает 2°, а при 87° превышает 5°. На карте погрешности видна основная ось симметрии, соответствующая азимуту в 0°, и две вторичных оси симметрии на -45° и 45°. Но при -45° по центру структуры симметрия нарушена вытянутыми лепестками. Помимо вытянутых лепестков, идущих от вторичных осей симметрии, наблюдаются кольцеобразные структуры с характерным размером в 10°, которые отчетливо видны вблизи 0°, -90° и 90° по азимуту. Наибольшие погрешности наблюдаются выше 75° по углу возвышения, преимущественно в отрицательной области по азимуту -90° до 0°.

На рис. 10 представлена погрешность измерения угла возвышения цели по диапазону однозначности от 10° до 90° по углу возвышения, т.к. в диапазоне до 10° идет резкий рост погрешности, при 9° погрешность в некоторых местах превышает 2°, а при 0° превышает 6°. На карте погрешности видна основная ось симметрии, соответствующая азимуту 0°, и вторичная, соответствующая азимуту в 45°, но уже на -45° ось симметрии практически отсутствует. На этой структуре также наблюдаются кольцеобразные структуры с характерным размером в 10°. Наибольшие погрешности наблюдаются до 20° по углу возвышения, преимущественно в отрицательной области по азимуту -90° до 0°.

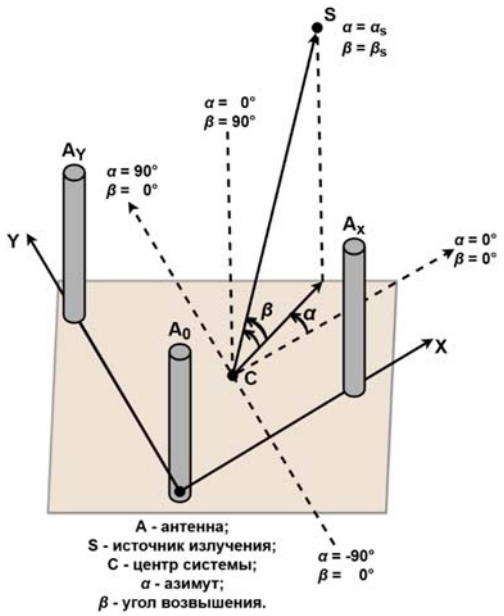


Рис. 8. Область однозначной пеленгации для исследуемой модели пеленгатора

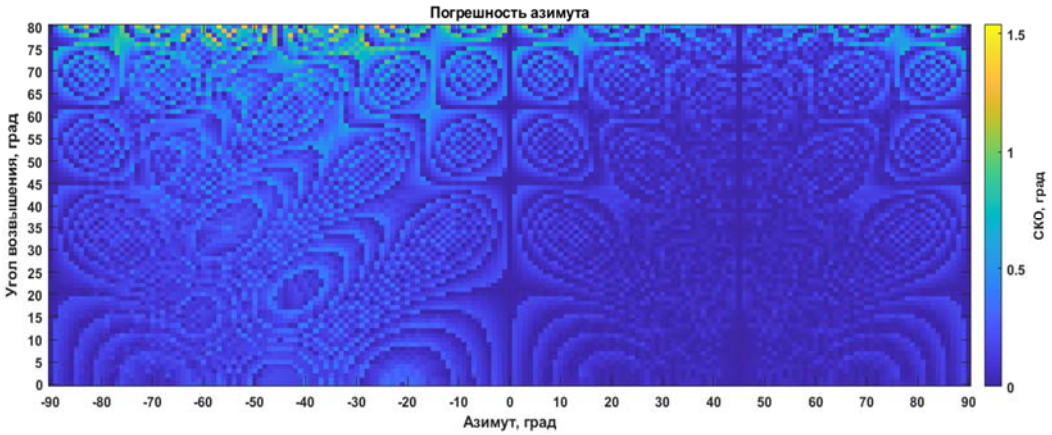


Рис. 9. Распределение погрешности азимута в диапазоне однозначности от 0° до 80° по углу возвышения и от -90° до 90° по азимуту

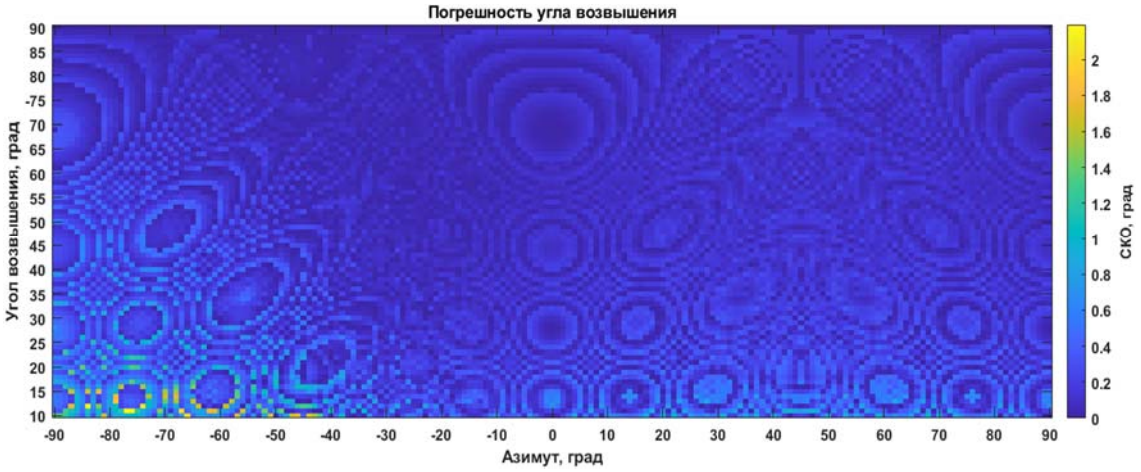


Рис. 10. Распределение погрешности угла возвышения в диапазоне однозначности от 10° до 90° по углу возвышения и от -90° до 90°по азимуту

На рис. 11 представлена суммарная погрешность углов азимута и возвышения в диапазоне однозначности от 10° до 80°, т.к. именно в пересечении этих областей погрешность не превышает 2°. Средняя арифметическая погрешность по выбранному диапазону составляет 0,3°. По полученному распределению СКО видно, что оптимальная область пеленгации не может находится как в плоскости антенной решетки, так и перпендикулярно ей, что обусловлено высокой разность фаз как минимум для одной фазометрической базы при таких углах пеленгации.

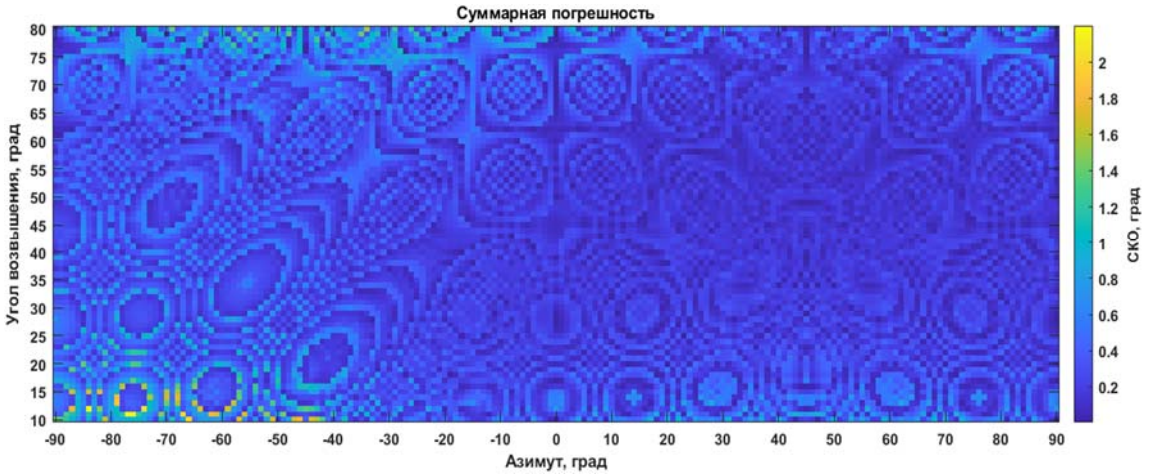


Рис. 11. Распределение суммарной погрешности углов азимута и возвышения в диапазоне однозначности от 10° до 80° по углу возвышения и от -90° до 90° по азимуту

В работе произведено имитационное моделирование трехантенного фазового пеленгатора, в основе которого использовался цифровой фазометр. Определена зависимость точности пеленга цели от углов азимута и возвышения. Определена оптимальная область пеленгации. Благодаря среде программирования MATLAB Simulink разработана модель фазового пеленгатора, разделенная на модули, соответствующие реальным элементам радиотехнической системы. Для области однозначности исследуемой модели пеленгатора рассчитано СКО в виде карт погрешности. Средняя погрешность составила 0,3°, оптимальный диапазон пеленга цели составил от 10° до 80° по углу возвышения и слабо зависит от азимута. На распределениях погрешности проявляются оси симметрии как соответствующие азимуту в 0°, так и -45° и 45°, а также наблюдаются кольцеобразные структуры с характерным размером в 10° и вытянутые лепестки. В области вблизи плоскости антенной решетки или перпендикулярно ей резко возрастает погрешность измерения азимута или угла возвышения, что обусловлено высокой разностью фаз для одной из фазометрических баз при таких углах пеленгации.

Список литературы

1. Плужников А.Д. и др. Качество радиолокационной пеленгации при коническом сканировании // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24. № 5. С. 50 – 65.

2. Шевченко М.Е., Малышев В.Н., Файзуллина Д.Н. Пеленгование источников радиоизлучения в широкой полосе частот с использованием круговой антенной решетки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 30 – 40.

3. Denisov V.P., Dubinin D.V., Meshcheryakov A.A. Physical and mathematical questions on signal processing in multibase phase direction finders // Russian Physics Journal. 2018. Vol. 60. No. 10. P. 1719 – 1727.

4. Lee H.-J., Kim Y.-D., Lee S.-B. // Computers & Industrial Engineering. 2008. No. 55. P. 134 – 149.

5. Jeon J.-H., Chae M.-H., Design and fabrication of a compact 2d phase comparison direction finder // Journal of Electromagnetic Engineering and Science. 2022. Vol. 22. No. 3.

6. Boiko J., Polikarovskykh O., Tkachuk V. Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle // Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2023. No. 13(1). P. 26 – 32.

7. Зимин А.С., Криницкий Г.В. Применение многоантенных систем для повышения помехозащищенности систем спутниковой радионавигации на подвижных объектах // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. № 51. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=29151 (дата обращения: 04.10.2023).

8. Васильев К.К. Математическое моделирование систем: учебное пособие Васильев К.К., Служивый М.Н. Ульяновск: УлГТУ. 2008. С. 170.

9. Kazakova G.N., Petrakova A.M., Shevtsova V.A. Accuracy estimation of a correlation interferometric direction-finder // Russian Aeronautics (Iz.VUZ). 2018. Vol. 61. No. 4. P. 620 – 628.

10. Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Федоров С.М., Черноиваненко И.А. Применение технологии виртуальных антенных решеток для повышения точности пеленгатора воздушного базирования // Вестник ВГТУ. 2022. Т. 18. № 3. С. 90 – 94.

11. Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Федоров С.М., Черноиваненко И.А. Применение технологии виртуальных антенных решеток для пассивных пеленгаторов беспилотных летательных аппаратов // Вестник ВГТУ. 2023. Т. 19. № 1. С. 27 – 31.

12. Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы. Томск: Изд-во ТУСУР. 2002. С. 252.

13. Патент № 2736543 Российская Федерация, МПК H03J 5/00 (2006.01), G01S 3/46 (2006.01). Радиофотонный фазовый пеленгатор: № 2020117258: заявл. 12.05.2020: опубл. 18.11.2020 – Гусеница Я.Н., Снегирев А.Л., Покотило С.А., Осадчий Д.В., Андреев Д.Е.

Пинчуков Владислав Владимирович, оператор научной роты, era_otd1@mil.ru, Россия, Анапа, Военный инновационный технополис «ЭРА»,

Парамонов Александр Андреевич, канд. техн. наук, заместитель начальника научно-исследовательского отдела, era_otd1@mil.ru, Россия, Анапа, Военный инновационный технополис «ЭРА»

SIMULATION MODELING OF A THREE-ANTENNA PHASE DIRECTION FINDER

V.V. Pinchukov, A.A. Paramonov

The article presents a simulation of a three-antenna phase direction finder based on a digital phase meter. The MATLAB Simulink environment was used to implement the model. The developed model has a block structure corresponding to the elements and devices actually used in radio engineering systems. A detailed description of the model and its components, including a digital phase meter, is given, which explains the simulation results. The dependences of the error of the digital phase meter on the magnitude of the phase difference of the signals and the distribution of bearing errors on the target of azimuth and elevation angles in the unambiguity range are presented. The reasons for the error growth in areas close to the plane and perpendicular to the antenna array are explained.

Key words: phase direction finder, simulation modeling, Simulink, digital phase meter.

Pinchukov Vladislav Vladimirovich, scientific company operator, era_otd1@mil.ru, Russia, Anapa, Innovativ Technopolis «ERA»,

Paramonov Alexander Andreevich, candidate of technical sciences, deputy head of the research department, era_otd1@mil.ru, Russia, Anapa, Innovativ Technopolis «ERA»

УДК 347.948.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-44-45

МОДЕЛЬ КОМПЕТЕНТНОСТИ ЭКСПЕРТА

Я.Н. Гусеница, О.В. Гречкина

В работе раскрыто понятие «компетентность». Выделены ключевые свойства компетентности эксперта. Проведен анализ существующих моделей компетентности эксперта. Предложена новая модель на основе нечетких множеств, которая учитывает ключевые свойства компетентности эксперта, необходимые для проведения экспертизы инновационных проектов.

Ключевые слова: эксперт, компетентность, свойства, модель, нечеткие множества.

Термин эксперт происходит от лат. expertus, что означает специалист, знающий по опыту, мастер своего дела, а также специалист, приглашаемый или нанимаемый за вознаграждение, для выдачи квалифицированного заключения или суждения по вопросу, рассматриваемому или решаемому другими людьми, менее компетентными в этой области.

В [9] эксперт – это носитель специальных знаний (человек или организация) и/или практического опыта, который:

– имеет объективные и достаточно полные (в его понимании) сведения об особенностях и свойствах внешнего объекта или его свойств (характеристик) в некоторой сфере деятельности и/или области знаний;

– независимо от внешних влияний и собственной выгоды четко и ясно высказывает суждения из области его специальных знаний и/или практического опыта по поставленным перед ним вопросам и/или рекомендации относительно предпочтительных (лучших) вариантов управленческих решений, касающихся данного объекта;

– несет ответственность за свое заключение, обладает правами и обязанностями, которые определены соответствующими нормативными документами;

– выполняя специальную ролевую функцию, включен в процесс принятия решений с тем, чтобы научно обосновать их.

В разных странах к экспертам предъявляются практически одинаковые требования, и важнейшие среди них – компетентность в исследуемой области.

«Компетентность» имеет очень похоже по звучанию на понятие «компетенция». Однако, оба понятия имеют различное значение.

Компетенция – это конкретные знания и навыки (умение что-то делать «руками», а не просто поговорить об этом) в какой-то довольно узкой области. При этом, под компетенцией иногда подразумевают еще и право принимать решения в виду занимаемой специалистом той или иной должности, как правило, руководящую («сотрудник компетентных органов» или «это действие вне рамок моих должностных компетенций»). В свою очередь, компетентность представляет собой обширную совокупность компетенций, неоднократно проверенных практикой и жизненным опытом человека.

Другими словами, компетенция – это способность специалиста применять знания, умения, навыки и проявлять социально-личностные качества для успешной деятельности в определенной области и является характеристикой действия. А компетентность – выраженная им способность применять знания, умения и навыки, а также проявлять социально-личностные качества и является характеристикой личности.

Следовательно, компетентность – это более широкое понятие, которое включает в себя, как правило, несколько компетенций. Для того, чтобы стать компетентным, надо освоить некоторые аспекты деятельности, которые являются компетенциями.

Под компетентностью эксперта (от лат. competo – соответствовать, быть годным) в дальнейшем будем понимать объем определенных специальных знаний из области теории экспертизы и методик, которые обеспечивают решение всех возможных вопросов, относящихся к конкретной экспертизе.

Различают объективную и субъективную компетентность.

Объективная компетентность представляет собой объем знаний, которыми должен владеть эксперт. Субъективная компетентность – степень, в которой конкретный эксперт владеет знаниями. Субъективную компетентность определяется образовательным уровнем эксперта, специальной экспертной подготовкой, стажем экспертной работы, опытом в решении аналогичных экспертных задач, индивидуальными способностями и т.д.

В научной литературе можно найти многочисленные свойства, которые определяют компетентность эксперта.

Директор Гудзоновского института Г. Канн считает, что главным свойством компетентности эксперта является креативность мышления, интуиция. По его мнению, для эксперта самая большая угроза – именно чрезмерный профессионализм, он чаще всего приводит к склонности не замечать ничего, что выходит за рамки сложившихся представлений, подкрепленных большим объемом документальных данных. В этой связи одной из целей исследований, проводимых Гудзоновским институтом, стало «подстегивание воображения».

В докладе о человеческом развитии, опубликованном Программой развития Организации Объединенных Наций, креативность мышления является одним из ключевых свойств компетентности.

Д.П. Гилфордом креативность мышления представлена четырьмя свойствами, связанными между собой [2]:

– продуктивность:
– гибкость;
– оригинальность;
– нетривиальность.

Продуктивность – свойство, которое характеризует беглость (скорость) творческого мышления специалиста и определяется общим числом созданных новых идей и предметов в единицу времени. Чем выше творческая продуктивность человека, тем больше новых идей он готов создавать. Развивается креативная беглость в основном с опытом: хорошим знанием алгоритмов генерирования новых идей, а также практикой применения этих алгоритмов. По мнению основателя теории решения изобретательских задач Г. Альтшуллера, многие изобретатели постепенно приобретают навык продуктивности творческого процесса и способны быстро предлагать новые решения.

Гибкость – свойство, которое характеризует способность предлагать творческие решения, основанные на разных алгоритмах или из разных областей знаний. У человека может быть высокая творческая производительность, однако все его идеи могут быть однородными. Поэтому гибкость мышления является важнейшим свойством креативности. Одним из факторов развития гибкости творческого мышления является умение применять различные фреймы и модели восприятия.

Оригинальность – свойство, характеризующее своеобразие креативного мышления специалиста, необычность подхода к решению творческих задач. Для развития оригинальности важно не только знать алгоритмы разрыва шаблона, фрейминга, но и обладать личностными качествами, которые выделяют эксперта среди остальных людей. По сути, оригинальность не является ключевым свойством, однако показывает, насколько мышление человека способно давать неординарные ответы.

Нетривиальность – свойство, характеризующее детальность образов творческого мышления, проработанность предлагаемых идей. Например, изобретатель должен создавать новые продукты с продуманным механизмом работы, которые выполняют определенную поставленную цель. А предприниматель должен предлагать рентабельные бизнес-идеи, на которые есть спрос. Свойство сложности креативного мышления определяет жизнеспособность идей и профессионализма эксперта.

В [3] выделены следующие свойства компетентности: уровень образования; опыт работы в рассматриваемой области; независимость; экспертный опыт; знания методов нечисловой статистики.

В [4] предлагает использовать в качестве свойств компетентности экспертов на основе трех рейтингов:

1. Базовый рейтинг:
– количество научных публикаций;
– стаж работы по заданной тематике;
– образование, ученая степень, ученое звание;
– участие в работе ученых, научно-технических, и диссертационных советах;
– наличие результатов интеллектуальной собственности (патентов на изобретения, полезные модели, промышленные образцы и т.д.).

2. Индивидуальный рейтинг:
– ответственность в экспертной деятельности;
– креативность, творческий подход;
– уровень независимости (экономической и административной);
– восприимчивость к внешней среде (динамике рынка);
– умение работать в групповой экспертной деятельности.

3. Рейтинг текущей деятельности:
– количество тематических рубрик, разделов, подразделов, по которым работает эксперт;
– частота запросов эксперту и предоставление им материалов;
– соответствие объемов запрашиваемых и предоставляемых материалов;
– время задержки ответов эксперта на запросы;
– заполненность профиля эксперта и индивидуальных характеристик экспертов;
– динамика взаимодействия эксперта с коллегами при экспертизе;
– объем использованных экспертов текстов экспертов;
– взвешенная оценка эксперта другими экспертами.

Приведенные свойства компетентности подразумевают не только опыт экспертной работы, но и возможность оценки эксперта другими коллегами.

В [10] выделяется личностно-профессиональные особенности экспертов как объекта акмеологической оценки, в том числе:

– должностное положение эксперта, ученое звание, количество опубликованных работ, количество ссылок на эти работы;

– стаж работ эксперта в области, связанной с объектом прогнозирования;

– устойчивость взглядов кандидата в эксперты, умение отстаивать свои позиции и преодолевать ранее сложившиеся стереотипы;

– способность к нелинейному мышлению, к рассмотрению проблемы с разных сторон, с разных позиций.

В Научно-исследовательском институте – Республиканском исследовательском научно-консультационном центре экспертизы (НИИ РИНКЦЭ) к свойствам, характеризующим компетентность эксперта относят: наличие научных трудов в данной области знания, ученой степени, ученого звания, научный стаж работы и т.д.; базовое образование; занимаемая должность, место работы (регион); принадлежность к той или иной экспертной системе (ВАК, отраслевые советы и т.д.); занятость экспертными работами в настоящий момент; исполнительность; текущий рейтинг в экспертном сообществе; год рождения и др. Кандидаты в эксперты НИИ РИНКЦЭ должны иметь: научный стаж; научные труды и разработки в данной предметной области знания; научный статус (научный руководитель, главный конструктор проектов и т.п.); опыт участия в экспертных работах; принадлежность к определенной научной школе.

Учитывая отечественный и зарубежный опыт, а также необходимость объективного документального подтверждения компетентности экспертов, в качестве базовых свойств предлагается использовать следующие:

– профессиональные знания;

– креативность;

– экспертную культуру.

Профессиональные знания могут быть получены экспертом теоретическим и эмпирическим путем. Именно поэтому профессиональные знания определяются уровнем профессионального образования, ученой степенью и ученым званием по специальностям, соответствующим тематике инновационного проекта, а также опытом работы эксперта в предметной области.

Креативность отражает способность эксперта творчески подходить к решению научно-практических задач. В [8] в качестве индикатора креативности ученых предлагается использовать их публикационную активность, что обусловлено рядом объективных причин. В частности, публикации создают научную репутацию, способствуют продвижению разработки, заключению контрактов и получению грантов, а также служат мерой оценки результативности научных работников. Важным аспектом публикационной активности является наличие научных статей, в которых ученый является единственным автором, поскольку он несет персональную ответственность за качество представленных материалов и результаты исследований. Ритмичность издания таких публикаций может свидетельствовать о продуктивности ученого. При этом, универсальный десятичный классификатор (УДК) научных статей позволяет определить области научного интереса.

Следует отметить, что ведущие открытые издания, входящие в перечень Высшей аттестационной комиссии (ВАК), предъявляют достаточно серьезные требования к публикациям. Статьи подвергаются рецензированию профильными специалистами, проверке на плагиат. Доступность материалов в открытых изданиях не исключает как возможность критики, так и интереса со стороны научной общественности, определяемого индексом цитируемости. Таким образом, креативность может определяться публикациями в открытых научных изданиях ВАК, в которых эксперт является единственным автором, их тематикой, периодичностью, а также вниманием со стороны научной общественности.

Экспертная культура отражает количественные и качественные результаты, полученные экспертом при проведении экспертизы. Определяется количеством проведенных экспертиз, точностью и своевременностью оценок. Следовательно, экспертная культура зависит от опыта эксперта, полученного при проведении экспертиз.

Анализ указанных выше свойств показывает, что компетентность эксперта может быть подтверждена качественно на основе имеющихся у специалиста дипломов, свидетельств, индекса цитируемости и т.д. Вместе с тем, помимо качественной оценки компетентность должна определяться количественно на основе показателей свойств, позволяющих их выявлять, наблюдать и надежно измерять.

Сложность формализации свойств компетентности эксперта отмечено в различных трудах многочисленных отечественных и зарубежных исследователей. В большинстве из них выделяются лишь ключевые свойства, которые можно количественно определить через показатели.

Совокупность показателей, которые позволяют охарактеризовать знания, умения и навыки специалиста, необходимые для проведения экспертизы в конкретной области, формируют модель компетентности эксперта.

Данная модель является собой упрощенным представлением компетентности эксперта. Она свободна от ряда второстепенных черт и сохраняет только существенные свойства компетентности эксперта.

Крупный специалист по системному анализу Э. Квейд предлагает использовать показатель надежности, определяемый как относительная частота случаев, когда данный эксперт приписал большую вероятность тому варианту оценки объекта, который впоследствии оказался правильным, т.е. чем чаще подтверждается правильность суждений эксперта, тем выше его компетентность.

По мнению О. Халмера, к такой трактовке оценивания компетентности эксперта следует относиться осторожно: в определенных условиях даже неспециалист может выносить суждения очень высокой степени достоверности. Он полагает, что компетентность должна выражаться не столько абсолютным показателем, сколько относительным, т.е. следует оценивать справедливость суждений эксперта по сравнению с суждениями человека, не имеющего специальной подготовки. В связи с этим О. Халмер предлагает использовать другой показатель для характеристики компетентности эксперта – точность. От специалиста высокой квалификации можно ожидать, что из гипотез, которым он приписывает, например, 70% вероятность, примерно 70% со временем получат подтверждение. В этом смысле точность не гарантирует надежности, но в сочетании оба эти показателя могут быть достаточными, чтобы формализовать компетентность эксперта.

Вместе с тем, использование показателей, предложенных Э. Квейдом и О. Халмером, предполагает весьма громоздкий и трудоемкий процесс оценивания компетентности, необходимость специальных экспериментов в данной области, чтобы в конечном итоге выработать надежную шкалу квалификации.

В [7] приведена векторная модель компетентности эксперта. Свойства компетентности определены показателями, выраженными в баллах: возраст (лет); трудовой стаж (лет); стаж работы в данной тематической области (лет); стаж работы в научно-исследовательской организации (лет); количество публикаций (за последние 10 лет);

количество выступлений на конференциях, ученых и научно-технических советах (за последние 3 года); занимаемая должность (в баллах от 1 до 5); ученая степень (в баллах от 0 до 2); количество рецензий статей в научные журналы (за последние 3 года); количество проведенных экспертиз (за последние 3 года); количество ссылок на работы кандидата в эксперты (в ведущих научных журналах по данной тематике за последние 10 лет); количество премий, полученных кандидатом в эксперты на конкурсах научных работ (последние 5 лет); стаж преподавательской работы (лет); мнение о кандидате членов Ученых советов (отношение числа голосов за кандидата в эксперты к общему числу голосующих); мнение о кандидате руководства организации (положительное: +1, отрицательное: 1); самооценка компетентности (в баллах от 1 до 10). К недостаткам модели можно отнести большое количество учитываемых свойств, представленных в виде вектора и затрудняющих получить интегральный показатель компетентности эксперта.

В работе [11] представлена общая иерархическая модель компетентности эксперта. В ней основными свойствами компетентности, которые определены показателями, являются (см. таблицу 1): уровень образования; опыт работы по профилю предметной области; административная независимость в данной сфере; способность решать творческие задачи. Существенным недостатком представленной модели является сложность определения показателей, характеризующих способность решать творческие задачи, и административная независимость в рассматриваемой сфере.

Таблица 1

Иерархическая модель компетентности эксперта

Кол-во баллов	Уровень образования	Опыт работы по профилю предметной области	Административная независимость в данной сфере	Способность решать творческие задачи
1	среднее	от 1 до 3 лет	работает в том же органе принятия решения	отсутствует
2	среднее профессиональное	от 3 до 5 лет	непосредственно в ходе выполнения своих организационных функций связан с организацией	низкая
3	высшее	от 5 до 10 лет	работает в той же организации, но непосредственно не влияет на принятие решений	средняя
4	кандидат наук	от 10 до 20 лет	знаком с работой организации	выше среднего
5	доктор наук	свыше 20 лет	полная независимость	высокая

Дальнейшим развитием является модель компетентности эксперта для решения задач определения степени сформированности компетенций военных специалистов, проведении экспертизы программного обеспечения вооружения, военной и специальной техники, достижения требуемой достоверности метрологического обеспечения образцов ракетно-космической техники [1, 5, 6]. В частности, при оценивании компетентности экспертов учитывается ученые звания и занимаемая должность. Вместе с тем, такие показатели, как административная независимость в данной сфере и способность решать творческие задачи, в модели не учитываются.

Следует отметить, что в настоящее время не существует единой общепризнанной модели компетентности экспертов для определения его участия в конкретной экспертизе.

Учитывая важнейшие свойства компетентности эксперта, необходимые для проведения экспертизы инновационных проектов, а также сложность их формализации, предлагается модель (рисунок 1).

Рис. 1. Компоненты модели компетентности эксперта

Модель включает одну статистическую и две нечеткие компоненты.

К статистической компоненте относятся показатели экспертной культуры, расчет которых осуществляется на основе апостериорной информации. В качестве показателей выступают:

– точность оценки, выставляемая экспертом;

– своевременность оценки, выставляемая экспертом.

Точность оценки рассчитывается по формуле:

$$E_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{M} \left| x_{эi} - x_{\Sigma i} \right|}{\sum_{i=1}^{M} x_{\Sigma i}},$$

где M – количество экспертиз, проведенных экспертом; $x_{эi}$ – i-я оценка эксперта; $x_{\Sigma i}$ – i-я суммарная оценка экспертной группы.

Своевременность оценки вычисляется на основе следующего выражения:

$$O_2 = M_C / M,$$

где M_C – количество своевременно проведенных экспертиз за отведенное время $t \le T_э^д$.

К нечетким компонентам относятся показатели профессиональных знаний и креативности эксперта.

Показатели профессиональных знаний определяются лингвистическими переменными «специалитет», «магистратура», «аспирантура», «докторантура», «кандидат наук», «доктор наук», «доцент/старший научный сотрудник», «профессор», «низкий опыт», «средний опыт», «большой опыт», принимающие значения на основе функций принадлежности, которые представлены на рисунке 2. Следует отметить, что для определения показателя эмпирических знаний необходимо определить суммарную продолжительность лет, отработанных экспертом в сфере, которая схожа с тематикой инновационного проекта.

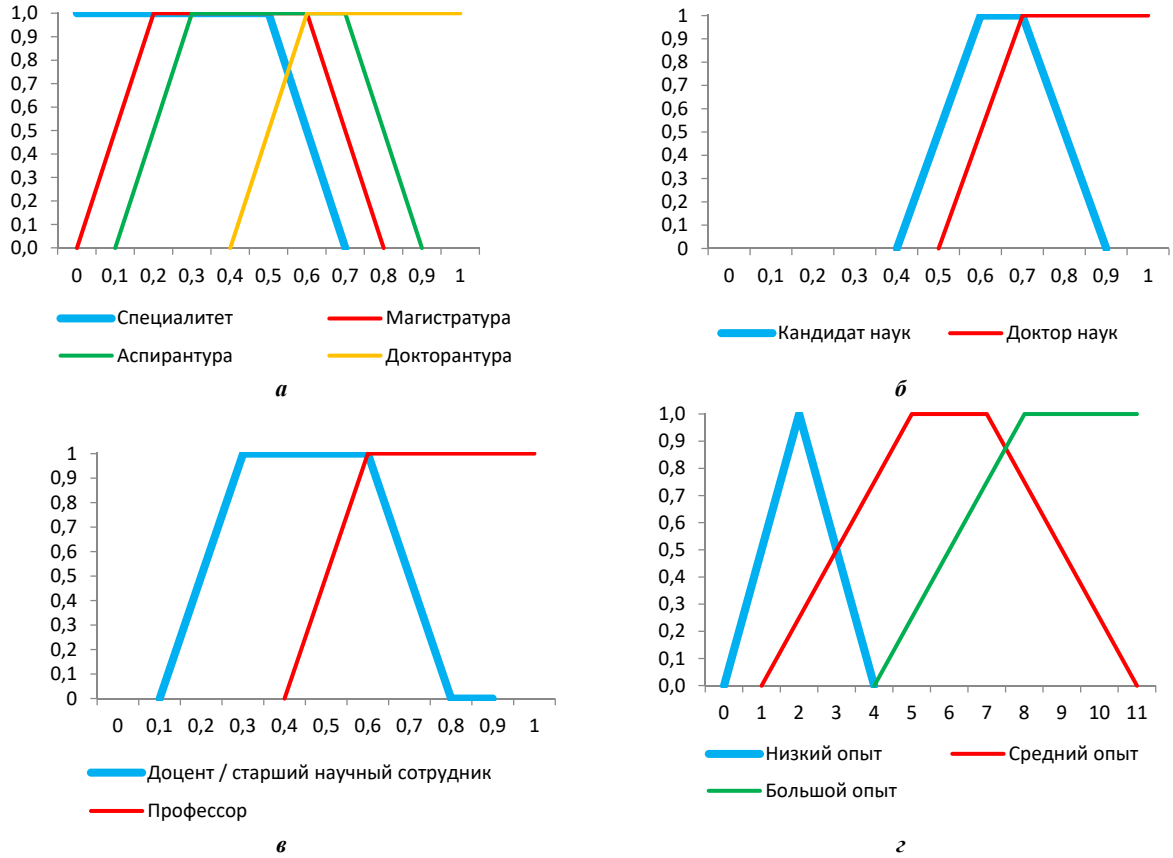


Рис. 2. Показатели профессиональные знаний эксперта: а – уровень образования; б – ученая степень; в – ученое звание; г – опыт работы по тематике инновационного проекта, лет

Показатели креативности определяются лингвистическими переменными «низкая», «средняя», «высокая» для продуктивности, гибкости и нетривиальности эксперта, принимающие значения на основе функций принадлежности, которые представлены на рисунке 3. При этом, определению показателей предшествует расчет аргументов функции принадлежности.

Аргумент функции принадлежности продуктивности эксперта вычисляется по формуле:

$$x_{C1} = N_\Sigma / T_н,$$

где N_Σ – количество публикаций в открытых научных изданиях ВАК, в которых эксперт является единственным автором; $T_н$ – научный стаж, лет.

Для функции принадлежности гибкости эксперта аргумент определяется количеством УДК публикаций в открытых научных изданиях ВАК, в которых эксперт является единственным автором. Наконец, для функции принадлежности нетривиальности эксперта аргумент соответствует количеству цитирований на публикации в открытых научных изданиях ВАК, в которых эксперт является единственным автором.

$$W = \gamma_K \left(\beta_T f\left(\bigcup_{i=1}^{3} \alpha_{Ti} \cdot \mu_{Ti}(x) \right) + \beta_P f\left(\mu_P(x)\right) \right) + \gamma_C f\left(\bigcup_{j=1}^{3} \beta_{Cj} \cdot \mu_{Cj}(x) \right) + \gamma_E \sum_{k=1}^{2} \beta_{Ek} \cdot E_k,$$

где $f(\bullet)$ – функция дефаззификации нечетких функций; γ_K, γ_C, γ_E – весовые коэффициенты относительной важности соответственно профессиональных знаний, креативности и экспертной культуры, значение которых определяется при условии $\gamma_K + \gamma_C + \gamma_E = 1$; β_T, β_P – весовые коэффициенты относительной важности соответственно теоретических и эмпирических знаний эксперта, значение которых определяется при условии $\beta_T + \beta_P = 1$; β_{Cj} – j-е весовые коэффициенты относительной важности соответственно продуктивности, гибкости и нетривиальности эксперта, значение которых определяется при условии $\beta_{C1} + \beta_{C2} + \beta_{C3} = 1$; β_{Ek} – k-е весовые коэффициенты относительной важности со-

ответственно точности и своевременности оценок, выставляемых экспертом, значение которых определяется при условии $\beta_{E1} + \beta_{E2} = 1$; α_{Ti} – i-е весовые коэффициенты относительной важности соответственно уровня образования, ученой степени и ученого знания эксперта, значение которых определяется при условии $\alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \alpha_{T3} = 1$; $\mu_{Ti}(x)$ – функции принадлежности теоретических знаний эксперта; $\mu_P(x)$ – функция принадлежности эмпирических знаний эксперта; $\mu_{Ti}(x)$ – функции принадлежности креативности эксперта.

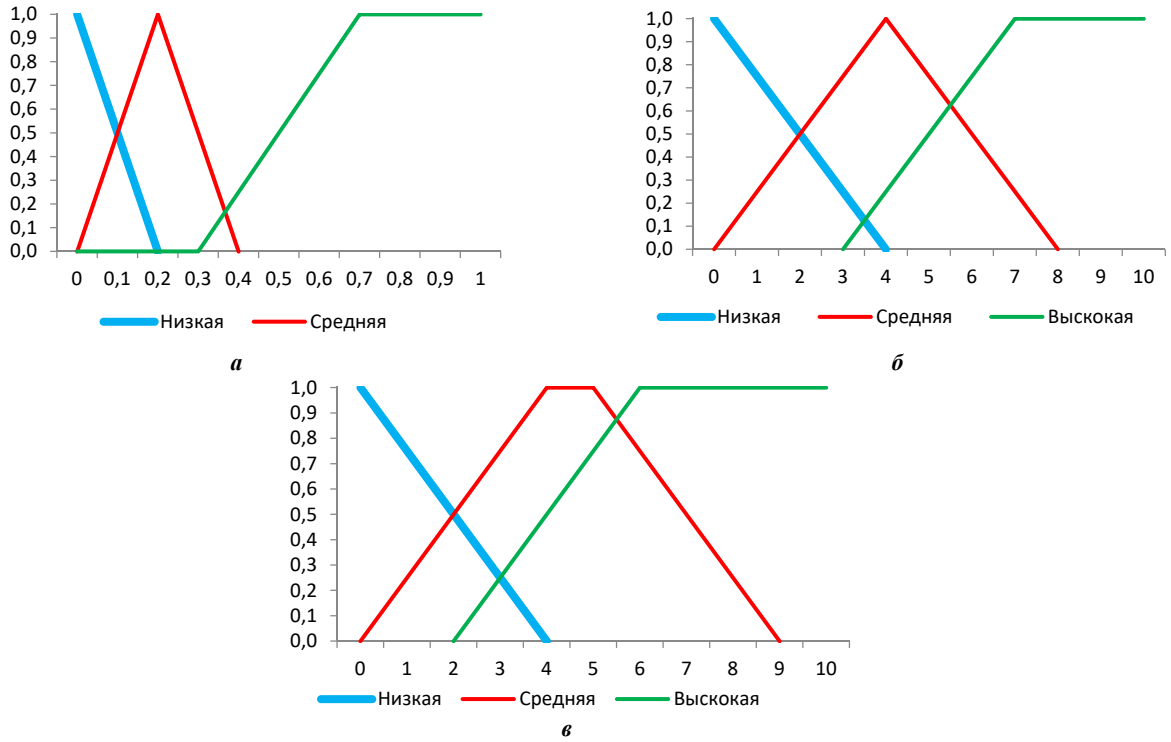


Рис. 3. Показатели креативности эксперта: а – продуктивность; в – гибкость; в – нетривиальность

Если аргументы абсолютных величин преобразовать в относительные, то компетентность эксперта может быть определена на основе следующего выражения (рисунок 4):

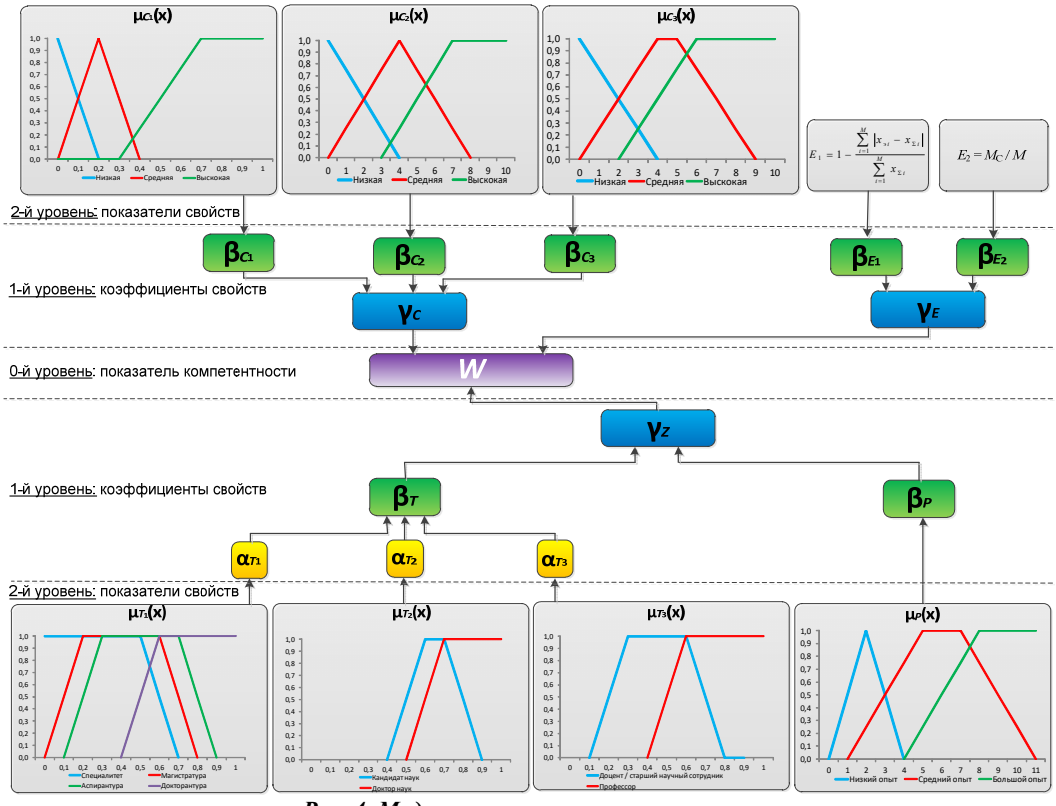


Рис. 4. Модель компетентности эксперта

Интегральный показатель меняется в интервале от 0 до 1 и позволяет комплексно учесть ключевые свойства компетентности эксперта.

Таким образом, разработанная модель основана на использовании иерархической системы коэффициентов относительной важности и представлении ключевых свойств компетентности эксперта функциями принадлежности к нечетким множествам. Данная модель может быть использована при отборе экспертов для проведения экспертизы инновационных проектов.

Список литературы

1. Баранчук Н.А., Гусеница Я.Н. Методика оценивания степени сформированности компетенций военных специалистов // Человеческий капитал. 2020. № 3 (135). С. 94-103.

2. Богоявленская Д.Б. Психология творческих способностей. М.: Академия, 2002. 320 с.

3. Варжапетян А.Г., Семенова Е.Г., Смирнова М.С. Процедура отбора экспертов при оценке проектов методами нечисловой статистики // Тезисы Международного форума «Метрологическое обеспечение инновационных технологий». 2019. С. 22-25.

4. Воеводина Е.И., Наумов Д.В. Рейтингование экспертов как инструмент повышения эффективности сетевой экспертизы // Перспективы науки. 2017. № 8 (98). С. 7-12.

5. Гусеница Я.Н. Метод экспертизы программного обеспечения вооружения, военной и специальной техники // Техника средств связи. 2014. № 3 (142). С. 118-123.

6. Гусеница Я.Н., Новиков А.Н. Методика обеспечения достоверности результатов метрологической экспертизы образцов ракетно-космической техники // Информация и космос. 2017. № 2 (7). С. 154-159.

7. Панкова Л.А., Петровкий А.М., Шнейдерман М.В. Организация экспертизы и анализ экспертной информации. М.: Наука, 1984. 120 с.

8. Римская О.Н., Науменко С.Н. Стимулирование труда научных работников научно-исследовательского института // Экономика науки. 2022. Т. 8. № 3-4. С. 238-254.

9. Сидельников Ю.В. Формирование понятийно-терминологического аппарата экспертизы // Проблемы управления. 2017. Вып. 5. С. 18-30.

10. Степнова Л.А., Тюрин К.Г. Личностно-профессиональные особенности экспертов как объект акмеологической оценки // Акмеология. 2013. № 2 (46). С. 18-24.

11. Чернышева Т.Ю. Иерархическая модель оценки и отбора экспертов. Управление, вычислительная техника и информатика // Доклады ТУСУРа. 2009. № 1 (19). Часть 1. С. 168-173.

Гусеница Ярослав Николаевич, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела, era_otd1@mil.ru, Россия, Анапа, Военный инновационный технополис «ЭРА»,

Гречкина Олексия Валерьевна, младший научный сотрудник, Россия, Анапа, Военный инновационный технополис «ЭРА»

EXPERT COMPETENCE MODEL

Ya.N. Gusenitsa, O.V. Grechkina

The work reveals the concept of "competence". The key properties of the expert's competence are highlighted. An analysis of existing models of expert competence was carried out. A new model based on fuzzy sets is proposed, which takes into account the key properties of the expert's competence necessary for conducting the examination of innovative projects.

Key words: expert, competence, properties, model, fuzzy sets.

Gusenitsa Yaroslav Nikolaevich, candidate of technical sciences, head of research department, era_otd1@mil.ru, Russia, Anapa, Military Innovative Technopolis «ERA»,

Grechkina Oleksia Valerievna, junior researcher, Russia, Anapa, Military Innovative Technopolis «ERA»

УДК 654.022
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-50-51

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ В КАНАЛАХ РАДИОСВЯЗИ С ПОСТОЯННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Р.И. Кочубей, М.М. Бычковский, Н.Н. Зайкин, Е.В. Фатьянова, А.В. Свидло, О.В. Чуприков

В статье представлена методика оценки вероятности ошибки в каналах радиосвязи с постоянными параметрами при свертке сложного сигнала.

Ключевые слова: вероятность ошибки, сложный сигнал.

В настоящее время вопросы применения кодового формирования и обработки сложных сигналов для передачи дискретных сообщений [1, 2] интересует широкий круг специалистов. В частности, большой интерес представляют сложные сигналы, в которых каждый вариант передаваемого информационного сигнала $u_r(t)$ ($r=1,2,\ldots,m$; m - основание кода) на передающей стороне удлиняется в N раз и кодируется четверичнокодированной последовательностью [3]. Ввиду флуктуации фазы сигнала в каналах радиосвязи со случайными параметрами и аддитивными по-

мехами при кодовом формировании сложных сигналов с ППРЧ используется пара некогерентных дополнительных ЧМн сигналов. Это приводит к необходимости образования двух некогерентных каналов.

Следовательно, информационный сигнал $u_r(t)$ при кодовом формировании и обработке сложных сигналов с ППРЧ состоит из суммы двух дополнительных последовательностей, где каждая дополнительная последовательность состоит из суммы циклически сдвинутых информационных последовательностей

$$\sum_{k=1}^{n}\left|\sum_{j=1}^{N} a_{rj}U_{rj}E_{dj}^{(k)}\right|\cos 2\pi F_{U_{rj}^{(k)}}^{(k)}t_j \tag{1}$$

На выходе приемной стороны информационный сигнал состоит из суммы сдвинутых во времени элементов дополнительных последовательностей (2), не имеющих боковых выбросов в апериодической автокорреляционной функции.

$$\sum_{k=1}^{n}\sum_{j=1}^{N}(E_{d'j}^{'(k)T}Q)u_{rj}^{'(k)}(t_j+(j-1)t_j) \tag{2}$$

Произведем оценку вероятности ошибки при кодовой обработке сложных сигналов с ППРЧ при свертке элементов сложного сигнала по огибающей. Ограничимся рассмотрением двоичных (m=2) систем с активной паузой в каналах с постоянными параметрами и аддитивной помехой, помехи в каналах приема не коррелированны и аппроксимируемы нормальным белым шумом со спектральной плотностью G_0.

Представим передаваемый сигнал при кодовом формировании сложных сигналов в виде выражения:

$$u_r(tN)=\sum_{k=1}^{2}\left|\sum_{j=1}^{N} a_{rj}U_{rj}E_{dj}^{(k)}\right|\cos(2\pi F_{U_{rj}^{(k)}}^{(k)}t_j-\varphi_{rj}^{(k)}) \tag{3}$$

Пусть все компоненты $u_{rj}^{'(k)}$ имеют одинаковые энергии за время длительности элемента сложного сигнала и ортогональны в усиленном смысле. Следовательно, условие регистрации сигнала $u_r(t)$ можно представить в виде выражений:

$$\frac{N}{2}V_r^{(1)}(t+t_3)+\frac{N}{2}V_r^{(2)}(t+t_3)>\frac{N}{2}V_l^{(1)}(t+t_3)+\frac{N}{2}V_l^{(2)}(t+t_3), NV_r(t+t_3)>NV_l(t+t_3) \tag{4}$$

где r,l=1,2; r≠l.

Согласно правилу (4) осуществляется линейное сложение взвешенных результатов обработки принимаемых элементов сложного сигнала с соответствующих трактов приема. Данное правило можно применять в качестве подоптимального правила, где необходимо доказать, что и в этом случае потери в верности приема будут невелики. К сожалению, расчет вероятности ошибки для схем, реализующих правило (4), представляет собой очень сложную задачу. В связи с этим ограничимся оценкой помехоустойчивости оптимальных схем при приеме двоичных сигналов в каналах с постоянными параметрами. Для оценки вероятности ошибки условие регистрации $u_r(t)$ можно представить в виде [4, 5]:

$$V_r^2>V_l^2, r\neq l, l, r=1,2. \tag{5}$$

Если неравенство (5) не выполняется, то приемное устройство регистрирует символ $u_l(t)$. Вероятность ошибки при передаче символа $u_r(t)$ равна [4, 5]:

$$p_{ош}=P\left\{V_r^{(r)2}<V_l^{(r)2}\right\}, \quad r\neq l \tag{6}$$

где

$$V_r^{(r)2}=\sum_{k=1}^{n}V_{rk}^{(r)2}(t+t_3), \tag{7}$$

$$V_{rk}^{(r)}(t+t_3)=\sum_{j=1}^{N}E_{d'j}^{(k)T}Q\sum_{v=1}^{2}\frac{(-1)^{v+1}}{T}\sqrt{\left(\int_0^T u_{rj}^{'(k)}(t_j+(j-1)t_j)u_r^{(k)}(t_j+(j-1)t_j)dt\right)^2+\rightarrow} \tag{8}$$

$$\rightarrow\sqrt{+\left(\int_0^T u_{rj}^{'(k)}(t_j+(j-1)t_j)\tilde{u}_r^{(k)}(t_j+(j-1)t_j)dt\right)^2}$$

Тогда в случае априорно равновероятных передаваемых сигналов полная вероятность ошибки равна [25, 27]:

$$p=\frac{1}{2}\left[P\left\{V_r^{(r)2}<V_l^{(r)2}\right\}+P\left\{V_l^{(l)2}<V_r^{(l)2}\right\}\right]. \tag{9}$$

Для определения вероятности ошибки необходимо знать законы распределения величин $V_r^{(r)2}$ и $V_l^{(l)2}$. Как показано в работах [4, 5], величины $V_{rk}^{(l)}$ в рассматриваемых условиях распределены по обобщенному рэлеевскому закону с плотностью вероятности:

$$W_{rk}^{(l)}(x)=\begin{cases}\frac{x}{\sigma_r^{(l)2}}\exp\left(\frac{x^2+b_r^{(l)2}}{2\sigma_r^{(l)2}}\right)I_0\left(\frac{b_r^{(l)}x}{\sigma_r^{(l)2}}\right), & \text{если } x\geq 0,\\ 0, & \text{если } x<0\end{cases} \tag{10}$$

где $I_0(y)$ - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка;

$$\sigma_r^{(l)2}=\frac{2G_0P_{ck}}{T}, \tag{11}$$

$$b_r^{(l)}=\begin{cases}2P_{ck}, & \text{если } r=l\\ 0, & \text{если } r\neq l\end{cases} \tag{12}$$

В выражениях (11) и (12) G_0 - спектральная плотность аддитивной помехи и P_{ck} - средняя мощность j -го элемента сложного сигнала на входе приемного устройства. Очевидно, что при λ=1

$$P_{ck} = \frac{P_c}{n} \tag{13}$$

Характеристическая функция величины $V_{rk}^{(l)2}$ определяется выражением:

$$\theta_{rk}^{(l)}(u) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{rk}^{(l)}(x)\exp(kux^2)\,dx \tag{14}$$

Подставляя в (14) выражение (10) и интегрируя, получаем:

$$\theta_{rk}^{(l)}(u) = \frac{1}{1-2ku\sigma_r^{(l)2}}\exp\left(\frac{b_r^{(l)2}}{2\sigma_r^{(l)2}}\left(\frac{1}{1-2ku\sigma_r^{(l)2}}-1\right)\right). \tag{15}$$

Случайные величины $V_{rk}^{(l)}$ при различных k независимы. Следовательно, характеристическая функция величины $V_r^{(l)}$ имеет вид:

$$\theta_r^{(l)}(u) = \prod_{k=1}^{n}\theta_{rk}^{(l)}(u)\;\theta_{rk}^{(l)}(u) = (1-2ku\sigma_r^{(l)2})^{-n}\exp\left(\frac{nb_r^{(l)2}}{2\sigma_r^{(l)2}}\left(\frac{1}{1-2ku\sigma_r^{(l)2}}-1\right)\right) \tag{16}$$

Плотность вероятности величины $V_r^{(r)2}$ равна:

$$W_r^{(r)}(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\exp(kux)\theta_r^{(r)}(u)\,du \tag{17}$$

Подставляя в (17) выражение (15) и интегрируя, получаем:

$$W_r^{(r)}(x) = \begin{cases}\frac{x^{n-1}}{2\sigma_r^{(r)2}(b_r^{(r)}\sqrt{n})^{n-1}}\exp\left(-\frac{x+nb_r^{(r)2}}{2\sigma_r^{(r)2}}\right)I_{n-1}\left(\frac{b_r^{(r)}\sqrt{nx}}{\sigma_r^{(r)2}}\right), & \text{если } x \geq 0\\ 0, & \text{если } x < 0\end{cases} \tag{18}$$

где $I_{n-1}(y)$ - модифицированная функция Бесселя (n-1) -го порядка.

Подставляя в (16) выражение (12) при $r \neq l$, получаем характеристическую функцию величины $V_l^{(r)2}$:

$$\theta_l^{(r)}(u) = (1-2ku\sigma_l^{(r)2})^{-n} \quad , \quad r \neq l \tag{19}$$

Отсюда плотность вероятности величины V_l^2:

$$W_l^{(r)}(x) = \begin{cases}\frac{x^{n-1}}{(n-1)!(2\sigma_l^{(r)2})}\exp\left(-\frac{x}{2\sigma_l^{(r)2}}\right), & \text{если } x \geq 0\\ 0, & \text{если } x < 0\end{cases} \tag{20}$$

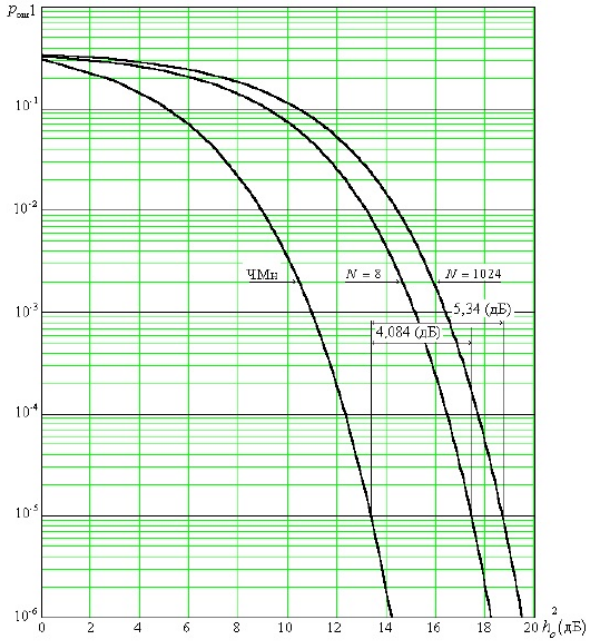
В соответствии с выражением (6)

$$p_r = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} W_r^{(r)}(x)\left[\int_{-\infty}^{x} W_l^{(r)}(y)dy\right]dx \tag{21}$$

Подставляя в (21) распределения V_r^2 и V_l^2 из (18) и (20) и интегрируя, получаем:

$$p_r = p_l = \sigma_l^{(r)2n}\exp\left(-\frac{nb_r^{(r)2}}{2(\sigma_r^{(r)2}+\sigma_l^{(r)2})}\right)\times$$
$$\times\sum_{k=0}^{n-1}\sigma_r^{(r)2k}\left(\sigma_{r1}^{(r)2}+\sigma_l^{(r)2}\right)^{-(k+n)}L_k^{n-1}\left[-\frac{b_r^{(r)2}n\sigma_l^{(r)2}}{2\sigma_r^{(r)2}(\sigma_r^{(r)2}+\sigma_l^{(r)2})}\right], \tag{22}$$

где $L_k^a(y) = \sum_{k=0}^{n-1} C_{n+a}^{n-a}\frac{(-y)^k}{k!}$ - полином Лагерра.



Зависимость вероятности ошибки ($p_{ош}$) от соотношения сигнал/помеха (h_0^2) в каналах связи с постоянными параметрами

Подставляя в (22) выражения (8) и (9) и учитывая соотношение (8), получаем выражение для вероятности ошибки в двоичной системе с активной паузой для канала с постоянными параметрами:

$$p_{ош} = \frac{1}{2^n}\exp\left(-\frac{h_0^2}{2}\right)\sum_{k=0}^{n-1}\frac{1}{2^k}L_k^{n-1}\left(-\frac{h_0^2}{2}\right), \tag{23}$$

где $h_0^2 = \frac{P_c T_c}{G_0}$ - отношение энергии элемента сложного сигнала к спектральной плотности аддитивной помехи G_0, аппроксимируемой нормальным белым шумом на входе приемного устройства.

Так, например, для *n=1* выражение (23) имеет вид:

$$p_{\text{ош}} = \frac{1}{2}\exp(-\frac{h_0^2}{2}). \quad (24)$$

Выражение (24) совпадает с выражением вероятности ошибки при некогерентном приеме ЧМн сигналов в каналах связи с постоянными параметрами.

При *n=2* с учетом пикфактора сложного сигнала выражение (23) будет иметь следующий вид:

$$p_{\text{ош}} = \frac{1}{2}(\frac{3}{4} + \frac{h_0^2}{8П^2})\exp(-\frac{h_0^2}{2П^2}). \quad (25)$$

Полученное аналитическое выражение (25) вероятности ошибки при кодовом формировании сложных сигналов позволяют рассчитать вероятность ошибки для систем с активной паузой в каналах связи с постоянными параметрами и аддитивной помехой, аппроксимируемой нормальным белым шумом со спектральной плотностью G_0.

Оценка вероятности ошибки при кодовой обработке сложных сигналов с ППРЧ приведены на рисунке в виде зависимости вероятности ошибки от соотношения сигнал/помеха, построенные по выражениям (24) и (25).

Проанализировав зависимости $p_{\text{ош}} = f(h_0^2)$ вероятности ошибки от соотношения сигнал/помеха представленные на рисунке, а также выражения (24) и (25), можно сделать следующий вывод, что при вероятности ошибки $p_{\text{ош}} = 10^{-5}$ энергетический проигрыш между выражением (24) и выражением (25) при N =8 и N =1024 составляет 4,084 (дБ) и 5,34 (дБ), соответственно.

Данная методика расчета вероятности ошибки позволит оценить помехоустойчивость дискретных сообщений при кодовом формировании и обработке сложных сигналов с ППРЧ в каналах связи с постоянными параметрами.

Список литературы

1. Зюко А.Г, Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. Теория электрической связи. Учебник для вузов. / Под. ред. Кловского Д.Д. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.

2. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров Л.М., Финк Л.М. Теория передачи сигналов. Учебник для вузов. М.: Связь, 1986. 304 с.

3. Велти. Четверичные коды для импульсного радиолокатора // Зарубежная радиоэлектроника, 1961. №4. С. 3-28.

4. Общая теория связи. Д.Л. Бураченко, Г.Д. Заварин, Н.И. Клюев и др. / Под ред. Л. М. Финка. Л.: ВАС, 1970. 412 с.

5. Окунев Ю.Б. Теория фазоразностной модуляции. М.: Связь, 1979. 216 с.

Кочубей Руслан Иванович, преподаватель, kochubey_ri@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого,

Бычковский Михаил Михайлович, преподаватель, bichkovskiy.mm@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого,

Зайкин Николай Николаевич, преподаватель, zaykin53@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого,

Фатьянова Елена Валентиновна, преподаватель, fatlen77@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого,

Свидло Александр Владимирович, преподаватель, svidlo_av@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого,

Чуприков Олег Валерьевич, преподаватель, chuprikov_ov@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого

ESTIMATION OF THE PROBABILITY OF ERROR IN RADIO COMMUNICATION CHANNELS WITH CONSTANT PARAMETERS WHEN CONVERSING A COMPLEX SIGNAL BY AN ENVELOPE

R.I. Kochubey, M.M. Bychkovsky, N.N. Zaikin, E.V. Fatyanova, A.V. Svidlo, O.V. Chuprikov

The article presents a method for estimating the error probability in radio communication channels with constant parameters when convolving a complex signal.

Key words: probability of error, complex signal.

Kochubey Ruslan Ivanovich, lecturer, kochubey_ri@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny,

Bychkovsky Mikhail Mikhailovich, lecturer, bichkovskiy.mm@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny,

Zaikin Nikolay Nikolaevich, lecturer, zaykin53@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny,

Fatyanova Elena Valentinovna, lecturer, fatlen77@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny,

Svidlo Alexander Vladimirovich, lecturer, svidlo_av@yandex.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny,

Chuprikov Oleg Valerievich, lecturer, chuprikov_ov@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny

УДК 622.232.83
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-54-55

МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ

Т.А. Акименко, Е.В. Ларкин, Фам Т.Л.

Построена аналитическая модель функционирования гидравлического насоса буровой машины. Представлена функциональная схема линейного гидропривода двухстороннего действия. Получены выражения для определения суммарного объемного расхода рабочей жидкости из полостей гидропривода через выходные дроссели с учетом симметрии устройства и постоянства проходных сечений выходных отверстий.

Ключевые слова: буровая установка, гидропривод, гидронасос, поршень, рабочая жидкость, дроссели, объемный расход.

Структурная схема буровой машины, работающей в режиме бурения, как объекта управления, разделяется на следующие относительно независимые узлы: гидравлическая трансмиссия, включающая трехфазный асинхронный электродвигатель с частотным регулированием насос и линейный гидропривод; полиспаст; вращатель; взаимодействующие бур и грунт. Гидравлическая система буровой машины представляет собой комплекс устройств, предназначенных для управления и приведения в действие исполнительных органов бурового оборудования рабочей жидкостью, нагнетаемой под давлением. Применение гидравлической системы позволяет упростить кинематику, повысить надежность работы оборудования, автоматизировать основные технологические операции при бурении.

Кинематическая схема гидронасоса аксиально-поршневого типа приведена на рис. 3 и рис. 4. Гидронасос включает вращающийся блок 1 цилиндров 2, в котором возвратно-поступательно движутся поршни 3, связанные посредством шарнирно-стержневого соединения 4 с платой 5, установленной на валу электродвигателя 6. Электродвигатель 6 установлен таким образом, что его вал связан шарнирно с валом блока 1 цилиндров 2 и образует с ним угол γ. Цилиндры вращающегося блока гидравлически связаны с входной 6 и выходной 7 магистралями через распределительную шайбу 8, которая при вращении блока цилиндров 1 обеспечивает подключение части цилиндров 2 к входной магистрали 6, а другой части цилиндров 2 - к выходной магистрали 7. Во входной магистрали 6 устанавливается атмосферное давление P_3, а в выходной магистрали 7 устанавливается высокое давление P_0, подаваемое на линейный гидропривод.

При разработке модели гидронасоса использованы следующие допущения:

рабочая жидкость является несжимаемой;

влияние упругости стенок трубопроводов пренебрежимо мало;

дросселирование рабочей жидкости осуществляется на выходном фильтре гидронасоса, и магистрали, соединяющей гидронасос с линейным гидроприводом.

поршни, работающие на всасывание жидкости, не создают крутящего момента вследствие того, что полости цилиндров, в которых перемещаются эти поршни, и входная магистраль находятся под одинаковым атмосферном давлением, а сечение входного отверстия достаточно велико, чтобы не создавать сопротивления ламинарному току рабочей жидкости.

Для построения математической модели функционирования гидронасоса вводятся следующие системы координат:

$xOyz$ - неподвижная система координат, центр *O* которой совпадает с центром платы 5, ось *z* параллельно направлению хода поршней *3* в цилиндрах 2, оси *x* и *y* образуют плоскость, ортогональную оси *z*;

$x'Oy'z'$ - система координат, центр *O* которой совпадает с центром системы координат $xOyz$, ось z' совпадает с осью вращения вала электродвигателя, ось y' совпадает с осью *y*, а ось x' повернута относительно оси *x* на угол γ.

угол φ_{3D} отсчитывается от положительного направления оси *x* в системе координат $xOyz$ и от положительного направления оси x' в системе координат $x'Oy'z'$;

угловая скорость вращения вала и углы $_{3D}$, $_3$ связаны следующим соотношением:

$$\omega_{3D} = \frac{d\varphi_{3D}}{dt};\ d\varphi_{3D} = d\varphi_3,$$

где φ_3 - угловая скорость вращения платы 5 с поршнями.

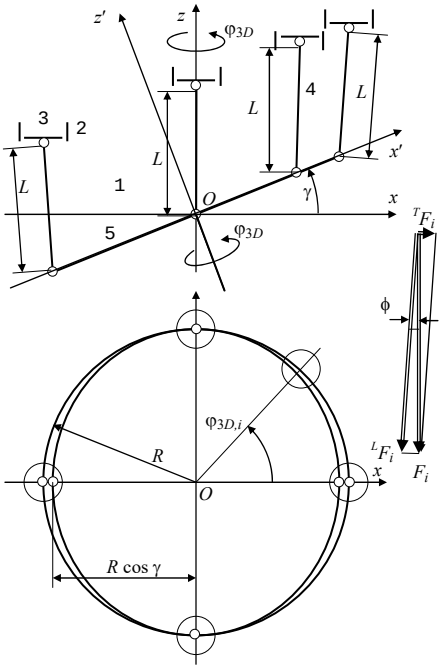


Рис. 1. Формирование сил, создающих момент на валу гидронасоса

В системе координат $xOyz$ представляются координаты шарниров, которыми центры поршней 3 соединяются со штангами шарнирно-стержневого соединения 4. По окружности радиусом *R* поршни устанавливаются с равномерным угловым шагом, равным $\frac{2\pi}{n}$. Таким образом, координаты *i*-го поршня равны

$$\begin{cases} x_i = R\cos\left[\varphi_{3D} + \frac{\pi(2i+1)}{n}\right]; \\ y_i = R\sin\left[\varphi_{3D} + \frac{\pi(2i-1)}{n}\right]: \\ z_i = 0, \end{cases}$$

где $0 \le i \le n-1$ - номер поршня; *n* - количество поршней; φ_{3D} - угол поворота вращающегося блока 1 цилиндров, равный углу поворота вала двигателя; x_i, y_i, z_i, - координаты *i*-го поршня в системе координат $xOyz$.

Аналогично в системе координат $x'Oy'z'$ координаты шарниров, которыми штанги шарнирно-стержневого соединения *4* соединяются с платой *5*, определяются выражением

$$\begin{cases} x'_i = R\cos\left[\varphi'_{3D} + \frac{\pi(2i+1)}{n}\right]; \\ y'_i = R\sin\left[\varphi'_{3D} + \frac{\pi(2i-1)}{n}\right]: \\ z'_i = 0, \end{cases} \quad (1)$$

φ_{3D} - φ'_{3D} - угол поворота платы относительно вала электродвигателя 6; x'_i, y'_i, z'_i, - координаты *i*-й точки крепления поршня в системе координат $x'Oy'z'$.

Пересчет координат из системы $x'Oy'z'$ в систему $xOyz$ осуществляется по зависимости:

$$\begin{pmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где x''_i, y''_i, z''_i - координаты x'_i, y'_i, z'_i в системе координат $xOyz$.

Из формулы для расчета длины штанги по координатам ее конечных точек могут быть получены значения координат *z* поршней в системе координат $xOyz$

$$z_i = \sqrt{L^2 - (x_i - x''_i)^2 - (y_i - y''_i)^2}. \quad (3)$$

Направляющий вектор пространственного положения *i*-й штанги в системе координат $xOyz$ определяется следующим образом:

$$\boldsymbol{\rho}_i = \begin{pmatrix} \rho_{ix} \\ \rho_{iy} \\ \rho_{iz} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_i'')^2 + (y_i - y_i'')^2 + (z_i - z_i'')^2}} \begin{pmatrix} x_i - x_i'' \\ y_i - y_i'' \\ z_i - z_i'' \end{pmatrix}, \tag{4}$$

где $\rho_{ix,}\, \rho_{iy}, \rho_{iz}$ - проекции вектора на оси *x*, *y*, *z*, соответственно; x_i , y_i - координаты *i*-го поршня, определяемые системой (18); z_i - координата *i*-го поршня, определяемая выражением (3); x_i'' , y_i'' , z_i'' -координаты точек шарнирного соединения штока и платы, определяемые матричным уравнением (2).

С учетом (4) угол φ_i между штоком и нормалью к плоскости поршня определяется по зависимости:

$$\phi_i = \arccos \frac{z_i - z''}{\sqrt{(x_i - x_i'')^2 + (y_i - y_i'')^2 + (z_i - z_i'')^2}}. \tag{5}$$

Нормаль к плоскости платы определяется в виде

$$\boldsymbol{\rho}_N = \begin{pmatrix} \rho_{Nx} \\ \rho_{Ny} \\ \rho_{Nz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\gamma \\ 0 \\ \cos\gamma \end{pmatrix}. \tag{6}$$

С учетом (4) и (6) угол ϕ_i между штоком и нормалью к плоскости платы определяется выражением:

$$\phi_i' = \arccos\left(\rho_{ix}\rho_{Nx} + \rho_{iy}\rho_{Ny} + \rho_{iz}\rho_{Nz}\right) = \arccos\left(\rho_{ix}\sin\gamma + \rho_{iz}\cos\gamma\right). \tag{7}$$

Гидронасос работает следующим образом. Крутящий момент μ, создаваемый на валу гидронасоса электродвигателем, уравновешивается моментами, создаваемыми поршнями, находящимися под давлением P_0:

$$\mu(t) = \sum_{i=1}^{n} \mu_i(t), \tag{8}$$

где $\mu(t)$ - суммарный момент на валу гидропривода; $\mu_i(t)$ - момент, создаваемы *i*-м поршнем на валу; *n* - количество поршней, подключенных к выходной магистрали.

Для определения объемного расхода рабочей жидкости следует оценить положение поршней во всех цилиндрах, одновременно находящихся под давлением P_0 . Положения поршней определяются зависимостью (3), а выражение для суммарного объемного расхода может быть получено путем дифференцирования суммы положений штоков цилиндров расходов по времени:

$$Q(t) = \kappa_Q \sum_{i=0}^{n/2-1} \frac{dz_i\left[\varphi_{3D,i}(t)\right]}{dt} = \kappa_Q \sum_{i=0}^{n/2-1} \frac{dz_i\left[\varphi_{3D,i}(t)\right]}{d\varphi_{3D,i}(t)} \frac{d\varphi_{3D,i}(t)}{dt}, \tag{17}$$

где $z_i\left[\theta_i(t)\right]$ - положение *i*-го поршня в текущий момент времени *t*, определяемое по зависимости (3); $\varphi_{3D,i}(t)$ - угловое положение *i*-го поршня в текущий момент времени *t*; κ_Q - коэффициент пропорциональности.

Но

$$\frac{d\varphi_{3D,i}(t)}{dt} = \text{const}_i = \theta(s) + \frac{2\pi}{n} f_{3D}$$

следовательно,

$$Q(t) = \kappa_Q' \left[\theta(t) + \frac{2\pi}{n} f_{3D} \right], \tag{18}$$

где $\kappa_Q' = \kappa_Q \sum_{i=0}^{n/2-1} \frac{dz_i\left[\varphi_{3,i}(t)\right]}{d\varphi_{3,i}(t)}$.

С другой стороны, суммарный расход рабочей жидкости определяется разностью давлений в напорной магистрали и рабочих полостях исполнительных гидромеханизмов, данном случае линейного гидропривода:

$$Q(t) = \vartheta f_1 \left[P_0(t) - P_1(t)\right]^{1/2} + \vartheta f_2 \left[P_0(t) - P_2(t)\right]^{1/2}, \tag{19}$$

где $P_0(t)$ - давление в рабочих на данный момент цилиндрах гидропривода и магистрали; f_1 - площадь эффективного сечения дросселя, через который осуществляется наполнение рабочей жидкостью первой полости линейного гидроцилиндра; f_2 - площадь эффективного сечения дросселя, через который осуществляется наполнение рабочей жидкостью второй полости линейного гидропривода; $P_0(t)$ - давление в магистрали; $P_1(t)$, $P_2(t)$ - давления в рабочих полостях линейного гидропривода.

Из вышеприведенной системы уравнений, описывающей кинематические связи и силовое взаимодействие узлов гидронасоса, а также из зависимости (18), может быть получена система, связывающая входное силовое воздействие (μ, f_{3D}, Θ) и выходные силовые параметры (P_0, Q) насоса.

$$\begin{cases} J_p \ddot{\Theta}(t) + \eta_p \left(\frac{2\pi}{n} f_{3D}(t) - \dot{\Theta}(t) \right) = \kappa_{P0,\mu} \cdot P_0(t); \\ Q(t) = \vartheta f_1(t) \left[P_0(t) - P_1(t)\right]^{1/2} + \vartheta f_2(t) \left[P_0(t) - P_2(t)\right]^{1/2}; \\ Q(t) = \kappa_Q' \left[\frac{2\pi}{n} f_{3D}(t) - \dot{\Theta}(t) \right], \end{cases} \tag{20}$$

где $\frac{2\pi}{n} f_{3D}(t) - \dot{\Theta}(t)$ - угловая скорость вала насоса с учетом скольжения; f_{3D} - const после выбора режима бурения, поэтому $\frac{df_{3D}}{dt} = 0$.

Линеаризация второго уравнения системы (19) и переход к операторной форме представления дифференциальных уравнения дает следующую систему:

$$\begin{cases} \left(J_p s + \eta_p\right)\left[\theta(s) + \frac{2\pi}{n} f_{3D}(s)\right] = \kappa_{P0,\mu} \cdot P_0(s); \\ Q(s) = a_{f,1,1} f_1(s) + a_{f,2,1} f_2(s) + a_{P,0,1} P_0(s) \\ + a_{P,1,1} P_1(s) + a_{P,2,1} P_2(s); \\ Q(s) = \kappa'_Q\left[\theta(s) + \frac{2\pi}{n} f_{3D}\right], \end{cases} \tag{21}$$

где s - оператор дифференцирования (переменная Лапласа; $Q(s)$ - изображение расхода рабочей жидкости по Лапласу; $f_1(s)$ - изображение переменного значения эффективного сечения первого клапана, через который производится наполнение первой рабочей полости линейного гидропривода, по Лапласу: $f_2(s)$ - изображение переменного значения эффективного сечения первого клапана, через который производится наполнение второй рабочей полости линейного гидропривода, по Лапласу, $P_0(s)$ - изображение давления в напорной магистрали по Лапласу; $P_1(s)$, $P_2(s)$ - изображение давлений в рабочих полостях линейного гидропривода по Лапласу; $\tilde{f}_1$, $\tilde{f}_2$, $\tilde{P}_0$, $\tilde{P}_1$, $\tilde{P}_2$ - точки, в которых осуществлялось разложение функции расхода через соответствующие клапаны, в ряд Тейлора;

$$a_{f,1,1} = \left(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1\right)^{1/2}; \; a_{f,2,1} = \left(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1\right)^{1/2}; \; a_{P,1,1} = -\tilde{f}_1\left(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1\right)^{-1/2};$$

$$a_{P,2,1} = -\tilde{f}_2\left(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_2\right)^{-1/2}; \; a_{P,0,1} = \tilde{f}_1\left(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1\right)^{-1/2} + \tilde{f}_2\left(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_2\right)^{-1/2}.$$

Функциональная схема линейного гидропривода двустороннего действия приведена на рис. 2.

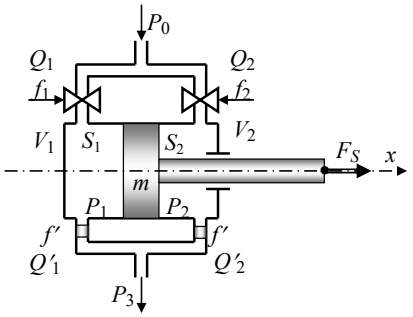


Рис. 2. Линейный гидропривод двустороннего действия

В состав привода входит поршень, цилиндр с двумя проточными полостями, V_1 и V_2, регулируемые клапаны f_1 и f_2, нерегулируемые дроссели f'_1 и f'_2 и шток F_{11}. Ход штока x и сила F_{11}, направленная вдоль штока, являются выходными параметрами привода. При описании привода двустороннего действия с прямым ходом штока примем следующие дополнительные допущения:

масса подвижных частей штока отнесена к массе поршня m;

вязкое трение в подвижных частях штока также учтено при описании каната;

привод жестко установлен на основание;

упругость штока и продольная упругость цилиндра пренебрежимо малы по сравнению с упругостью каната;

в гидросистеме циркулирует вязкая несжимаемая жидкость;

давление P_1 в полости V_1 и давление P_2 в полости V_2 обеспечивается двумя регулируемыми клапанами с эффективными площадями сечения f_1 и f_2, соответственно;

дроссели на выходах полостей цилиндров имеют одинаковые эффективные площади $f'_1 = f'_2 = f_3$;

перетекание рабочей жидкости из одной полости в другую отсутствует;

трубопроводы считаются линиями с сосредоточенными параметрами, гидравлические сопротивления трубопроводов отнесены к сопротивлениям соответствующих регулируемых клапанов и выходных дросселей.

С учетом принятых допущений объемные расходы рабочего тела через первый и второй регулируемые клапаны определяются зависимостями:

$$Q_1(t) = C_1 f_1(t)\sqrt{\frac{2\left[P_0(t) - P_1(t)\right]}{\rho}}; \tag{3}$$

$$Q_2(t) = C_2 f_2(t)\sqrt{\frac{2\left[P_0(t) - P_2(t)\right]}{\rho}}, \tag{4}$$

где C_1, C_2 - коэффициент расхода через первый и второй регулируемые клапаны; $f_1(t)$, $f_2(t)$ - площади проходных сечений первого и второго регулируемых клапанов, являющиеся управляющими воздействиями в приводе; ρ - плотность жидкости; $P_0(t) - P_1$ - перепад давления на первом регулируемом клапане; $P_0(t) - P_2(t)$ - перепад давления на втором регулируемом клапане; $P_0(t)$ - давление рабочей жидкости на входе в привод; *t* - время.

Суммарный объемный расход рабочей жидкости из полостей гидропривода через выходные дроссели с учетом симметрии устройства и постоянства проходных сечений выходных отверстий определяются в виде

$$Q'(t) = Q'_1(t) + Q'_2(t) = \vartheta' f' \left[\sqrt{P_1(t) - P_3} + \sqrt{P_1(t) - P_3} \right]; \quad (6)$$

где $Q'_1(t) = \vartheta' f' \sqrt{P_1(t) - P_3}$ и $Q'_2(t) = \vartheta' f' \sqrt{P_2(t) - P_3}$ - объемные расходы жидкости через первый и второй неуправляемые дроссели, соответственно; $\vartheta' = \tilde{N}' \sqrt{\frac{2}{\rho}}$; f' - площади проходных сечений неуправляемых дросселей; P_3 - атмосферное давление; $\tilde{N}'$ - коэффициент расхода через первый и второй выходные дроссели.

Поток является ламинарным, поэтому уравнение неразрывности имеет вид

$$Q'(t) = Q(t) = \vartheta' f' \left[\sqrt{P_1(t) - P_3} + \sqrt{P_1(t) - P_3} \right] \quad (6\text{-}1)$$

С учетом невысокого быстродействия привода, потоки жидкости в первой и второй полостях можно считать ламинарными, поэтому для них может быть записано уравнение неразрывности:

$$\begin{aligned} \vartheta f_1(t) \sqrt{P_0(t) - P_1(t)} &= \vartheta' f' \sqrt{P_1(t) - P_3} + S\dot{x}; \\ \vartheta f_2(t) \sqrt{P_0(t) - P_2(t)} &= \vartheta' f' \sqrt{P_2(t) - P_3} - S\dot{x}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $Q_1 = S\frac{dx}{dt} + Q'_1$; $Q_2 = -S\frac{dx}{dt} + Q'_2$; $\dot{x}$ - скорость движения штока; *S* - площадь поршня, одинаковая для левой и правой полостей.

Таким образом, построена аналитическая модель функционирования насоса с учетом воздействия частотного управляющего фактора.

Список литературы

1. Абубакиров В.Ф., Архангельский В.А., Буримов Ю.Г., Малкин И.Б. Буровое оборудование: справочник: в 2 т. Т. 1. М.: Недра, 2000.
2. Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование / под ред. А.М. Гусмана и К.П. Порожского. Екатеринбург: УГГА, 2002. 592 с.
3. Баграмов Р.А. Буровые машины и комплексы: учебник. М.: Недра, 1988. 501 с.
4. Денисов П.Г. Сооружение буровых: учебник. М.: Недра, 1989. 397с.
5. Ильский А.Л., Шмидт А.П. Буровые машины и механизмы: учеб ник. М.: Недра, 1989. 396 с.
6. Проталов В.Н., Султанов Б.З., Кривенков С.В. Эксплуатация оборудования для бурения скважин и нефтегазодобычи: учебник. М.: Недра, 2004.
7. Солод В.И. Горные машины и автоматизированные комплексы: учебник для вузов / В.И. Солод, В.И. Зайков, К.М. Первов. М.: Недра, 1981. 503 с.
8. Горные машины и комплексы: учебное пособие для курсового проектирования/ А.А. Хорешок, А.М. Цехин, Л.Е. Маметьев [и др.]. Горные машины и комплексы, 2026-08-10. Электрон. дан. (1 файл). Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва, 2018, 156 с.
9. Новоселов О.Н. Основы теории и расчета информационно–измерительных систем / О.Н. Новоселов, А.Ф. Фомин. М.: Машиностроение, 1991. 336 с.
10. Калашников В.И. Информационно–измерительная техника и технологии: учеб. для вузов / В.И. Калашников [и др.]; под ред. Г.Г. Раннева. М.: Высш. шк., 2002. 454 с.
11. Марутов В.А. Гидроцилиндры / В.А. Марутов, С.А. Павловский. М.: Машиностроение, 1966. 169 с.
12. Башта Т.М. Объемные гидравлические приводы / Т.М. Башта [и др.]. М.: Машиностроение, 1969. 628 с.
13. Башта Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем. М.: Машиностроение, 1974. 607 с.
14. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для вузов / Т.М. Башта [и др.]. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
15. Берман В.М. Системы гидропривода выемочных и проходческих машин / В.М. Берман, В.Н. Верескунов, И.А. Цетнарский. М.: Недра, 1982. 206 с.
16. Фам Т.Л. Разработка системы автоматического управления скоростью вращения и подачи долота бурового станка СБШ-250МН-32Т // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 5. С. 216-224.
17. Фам Т.Л. Исследование информационно-измерительной и управляющей системы проходческого комбайна // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 9. С. 46-52.

Акименко Татьяна Алексеевна, канд. техн. наук, доцент, tantan72@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ларкин Евгений Васильевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, elarkin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Фам Тхань Лием, аспирант, phamthanhliem1982@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

HYDRAULIC TRANSMISSION MODEL

T.A. Akimenko, E.V. Larkin, Pham Thanh Liem

An analytical model of the functioning of the hydraulic pump of a drilling machine has been constructed. A functional diagram of a linear double-acting hydraulic drive is presented. Expressions are obtained to determine the total volumetric flow rate of the working fluid from the cavities of the hydraulic drive through the output chokes, taking into account the symmetry of the device and the constancy of the flow sections of the outlet openings.

Key words: drilling rig, hydraulic drive, hydraulic pump, piston, working fluid, throttles, volumetric flow.

Akimenko Tatiana Alekceevna, candidate of technical sciences, docent, tantan72@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Larkin Eugene Vasilyevich, doctor of technical science, professor, head of chair, elarkin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pham Thanh Liem, postgraduate, phamthanhliem1982@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.414.32
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-59-60

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Н.Б. Назаров, И.Н. Набродова

Рассмотрены преимущества и недостатки различных систем для улучшения качества изображения, а также возможности и ограничения, существующих нейросетей. А также были рассмотрены алгоритмы и методы предобработки изображений, которые можно использовать при создании автоматизированной системы для улучшений качества изображения.

Ключевые слова: гистограмма, нелинейная коррекция, линейная коррекция, шум и шумоподавление, гамма-коррекция, логарифмическая коррекция.

Являясь важным мультимедийным информационным носителем, изображение содержит богатую информацию и прочно вошло в повседневную жизнь современного человека. С быстрым развитием технологий постоянно появляются приложения, связанные с графической обработкой, такие как классификация целей на основе изображений и распознавание целей для обработки и улучшения, что делает процесс обработки более удобным [1].

Улучшение и реконструкция изображения являются основными этапами обработки многих систем реального зрения. Их цель состоит в том, чтобы улучшить визуальное качество изображений и предоставить достоверную информацию для последующего визуального принятия решений.

В наши дни развитие технологий уже достигло такого уровня, что нейросети доступны всем желающим – существуют сервисы, которые позволяют пользоваться новыми разработками каждому, кому нужна помощь вычислительных технологий [2].

Цифровая обработка изображений – это использование возможностей компьютера для обработки цифровых изображений с помощью различных алгоритмов. Цифровая обработка изображений имеет множество преимуществ перед аналоговой обработкой изображений. Это позволяет применять к входным данным более широкий спектр алгоритмов и позволяет избежать таких проблем, как накопление шума и искажений во время обработки. Поскольку изображения определяются в двух измерениях (x и y), цифровая обработка изображений может быть смоделирована в виде многомерных систем (например, матрицы или диаграммы по различным параметрам). На создание и развитие цифровой обработки изображений в основном влияют три фактора: во-первых, развитие компьютеров; во-вторых, развитие математики; в-третьих, спрос на широкий спектр приложений в различных сферах деятельности (сельском хозяйстве, военном деле, промышленности и медицине).

Цифровая обработка изображений позволяет использовать гораздо более сложные алгоритмы и, следовательно, может предложить, как более сложную производительность при выполнении простых задач, так и реализацию методов, которые были бы невозможны аналоговыми средствами. Некоторые методы, которые используются в цифровой обработке изображений, включают: редактирование изображений, восстановление изображения, независимый компонентный анализ, линейная фильтрация, нейронные сети, дифференциальные уравнения в частных производных, пикселизация, сопоставление точечных объектов, анализ основных компонентов [3].

Существуют различные методы обработки изображений, рассмотрим некоторые из них:

1. Гистограмма – график распределения полутонов изображения, в котором по горизонтальной оси представлена яркость, а по вертикали – относительное число пикселов с данным значением яркости. Гистограмма изображения позволяет оценить количество и разнообразие оттенков изображения, а также общий уровень яркости изображения. Данный алгоритм позволит понять, какие цвета преобладают, чтобы принять дальнейшие решения. Например, в фотографии, сделанной при освещении с лампой накаливания, будут преобладать желтый или красные цвета. На гистограмме данные оттенки будут иметь повышенный график [4].

2. Линейная коррекция – используется для построения линейной функции тонов. Данный метод позволяет улучшить контрастность (например, если изображение имеет повышенный коэффициент синих тонов, то можно понизить контрастность и получить более естественные цвета), однако алгоритм не будет работать, если на изображении присутствуют одновременно белые и черные точки. Поэтому в подобных случаях следует использовать нелинейную коррекцию [5].

3. Нелинейная коррекция:

Гамма-коррекция – для правильного отображения на мониторе. Используется для улучшения распознавания деталей на слабо освещенных участках. Например, если изображение было сделано при слабом освещении и имеет мало светлых участков, то с помощью данного алгоритма можно увеличить гамму, за счёт чего повысится распознаваемость объектов в кадре. Однако, чем сильнее эффект, тем больше шумов и искажений появляются на изображении [6].

Логарифмическая коррекция – сжатие динамического диапазона при визуализации данных. Данный алгоритм позволит увеличить контрастность тёмного изображения для распознавания деталей в темных участках. Недостатками являются то, что алгоритм не может улучшать слишком яркое изображение, а также появляются шумы.

4. Шум и шумоподавление – устранение несовершенства приборов (фотокамер, теле-/видеокамер), обработка изображений с потерей данных. Данный алгоритм «сглаживает» пиксели и уменьшает мелкие детали. При использовании большого количества эффектов, съёмке при слабом освещении, изображение может иметь дефекты в виде зернистости или шума. Это возникает из-за того, что объектив камеры не способен выдавать хорошее качество в таких условиях. Данный алгоритм позволит устранить возникший шум. Из недостатков: алгоритм не восстановит слишком шумное изображение, а при частом применении может исказить мелкие объекты. [7]

Исходя из работы алгоритмов методов обработки изображения, использование одного метода не даст лучший результат, а лишь устранит недостатки на определенных участках и ухудшит общее качество на других участках изображения. Например, если изображение слишком темное и есть необходимость повысить распознаваемость деталей на изображении, то лучше всего использовать логарифмическую коррекцию и убрать возникшие шумы с помощью шумоподавления; если изображение светлое, то можно выровнять тон с помощью гаммы-коррекции, а также использовать шумоподавление; если изображение сделано при свете лампы накаливания или подобных случаях, когда камера передает неестественные цвета, то можно воспользоваться гистограммой, чтобы понять, какие цвета преобладают и с помощью линейной коррекции выровнять тон изображения. Таким образом, использование нескольких методов друг с другом позволит улучшить качество изображения в целом. А для лучшего результата необходимо позволить пользователю выбирать интенсивность применяемого эффекта, выводить предварительный результат на экран.

Список литературы

1. Digital image processing [Электронный ресурс]. URL: https/en.wikipedia.org/wiki/Applications_of_image_processing (дата обращения: 10.05.2023).

2. Image Enhancement Method Based on Deep Learning [Электронный ресурс]. URL: https://www.hindawi.com/journals/mpe/2022/6797367 (дата обращения: 10.05.2023).

3. Улучшение качества изображений [Электронный ресурс]. URL: https://www.cyberforum.ru/csharp-net/thread2017275.html (дата обращения: 10.05.2023).

4. Гистограмма [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Гистограмма_(фотография) (дата обращения: 10.05.2023).

5. Базовые методы обработки изображений [Электронный ресурс]. URL: http://mechanoid.su/cv-base.html (дата обращения: 10.05.2023).

6. Гамма-коррекция [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Гамма_коррекция (дата обращения: 10.05.2023).

7. Шумоподавление посредством усреднения изображений [Электронный ресурс]. URL: https://www.cambridgeincolour.com/ru/tutorials-ru/image-averaging-noise.htm (дата обращения: 10.05.2023).

Назаров Нурлан Бахтиярович, магистр, nazarov.nurlan121@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Набродова Ирина Николаевна, канд. техн. наук, доцент, ira1978@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

IMAGE QUALITY ENCHANCEMENT

N.B. Nazarov, I.N. Nabrodova

The advantages and disadvantages of various systems for improving image quality, as well as the possibilities and limitations of existing neural networks are considered. And also algorithms and methods of image preprocessing were considered, which can be used to create an automated system to improve image quality.

Key words: histogram, non-linear correction, linear correction, noise and noise reduction, gamma correction, logarithmic correction.

Nazarov Nurlan Bakhtiyarovich, master, nazarov.nurlan121@gmail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nabrodova Irina Nikolaevna, candidate of technical sciences, docent, ira1978@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.85
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-61-62

ПОДХОД К ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ

А.А. Воробьев, А.А Антошкин

Предложен подход к сбору и обработке информации о несанкционированных местах хранения твердых бытовых отходов на основе машинного обучения с использованием текстовых и графических данных, полученных из открытых источников, повышающих достоверность геоэкологического мониторинга.

Ключевые слова: геоэкологический мониторинг, достоверность информации, геопозиция, сегментация изображений, машинное обучение.

Осуществление общественного мониторинга регионов Российской Федерации в сфере экологической безопасности и охраны окружающей среды является одной из актуальных задач национального проекта – «Экология» [9]. Для оценки состояния окружающей среды, анализа процессов использования природных ресурсов и экологических прогнозов проводятся геоэкологические исследования [10]. Одним из актуальных видов геоэкологических исследований является геоэкологический мониторинг окружающей среды, базовой задачей которого выступает наблюдение, оценка и прогноз состояния окружающей среды для изучения изменений, вызываемых техногенной деятельностью [12]. Для решения этой комплексной задачи используются множество методов и наиболее актуальными в последние годы становятся методы, относящиеся к классу социального мониторинга [11]. На основе собранных данных из различных источников, включая социальные сети, СМИ, телевидение и др. формируется экологический рейтинг субъектов РФ [11] по трем сферам: экосфера, техносфера и социум. Для каждой сферы рассматриваются ряд индикаторов, например: атмосфера, водные ресурсы, земельные ресурсы, среда обитания, промышленная среда, твердые бытовые отходы и др.

В работе рассматривается последний индикатор, связанный с несанкционированными местами хранения твердых бытовых отходов (далее ТБО), относящимся, как известно, к наиболее актуальным проблемам загрязнения окружающей среды и оказывающих негативное воздействие на жизнедеятельность людей, так как ТБО зачастую располагаются непосредственно на территории лесных массивов или вблизи естественных водных объектов [5-8].

Для обеспечения мониторинга ТБО в настоящее время функционирует цифровой сервис «РЭО Радар» - информационная система сбора обращений граждан о нарушениях в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами [8].

Анализ функциональных возможностей информационной системы (ИС) «РЭО Радар» показал следующее:

1. В информационной системе предусмотрен самостоятельный ввод пользователем информации о несанкционированных местах хранения ТБО, но при этом отсутствует автоматический поиск сообщений в социальных сетях или публикаций в электронных СМИ, что позволило бы расширить функционал ИС с целью получения более достоверной информации о несанкционированных местах хранения ТБО.

2. Срок с момента подачи пользователем заявки до момента рассмотрения её администраторами составляет 30 суток, т.е. занимает достаточно длительное время, за которое место хранение ТБО продолжит увеличиваться, в том числе под воздействием природных явлений.

3. В ИС возможно дублирование заявок от различных пользователей, так как в «РЭО Радар» не реализовано предоставление информации о зарегистрированных несанкционированных местах хранения ТБО. Таким образом, пользователи сообщают об одних и тех же местах и администраторам системы требуется отвечать на каждую заявку.

С учетом того, что информации в ИС принимается путем прямых заявок от пользователей, то необходимо учесть ряд ее свойств, указанных в исследовании [6]:

- отсутствие контроля над информацией. Пользователи без ограничений могут отправлять заявки, а это значит, что не все из них содержат релевантную информацию;
- преднамеренная гиперболизация информации. Некоторые пользователи могут не объективно оценивать ситуацию, подавая заявку;
- ненамеренная неверная информация. Заявки от пользователей могут быть о тех проблемах, которые не входят в область ответственности ГИС «РЭО Радар», а также о законных местах хранения ТБО;
- умалчивание фактов, неполнота информации. Заявки, которые поступают от пользователей могут быть о тех незаконных местах хранения ТБО, которые появились в результате противоправных действий самих заявителей.

Таким образом, в результате анализа возможностей ИС «РЭО Радар» можно сделать следующий вывод о том, что достоверность данных полученных от пользователей является достаточно низкой и требуется её повышение. В работе выдвинута гипотеза о возможности повышения достоверности собираемой информации за счет использования автоматических процедур поиска сообщений о местах несанкционированного хранения ТБО в социальных сетях, содержащие координаты их местоположения и возможности их подтверждения с использованием фотоснимков, полученных из геоинформационной системы (ГИС) «Яндекс карты» [14]. Выбор ГИС «Яндекс-карты» основан на следующих ее достоинствах:

- ГИС разработана российской компании Yandex и имеет возможность интеграции требуемых сервисов, например, с Яндекс-поиск;
- регулярное обновление с высокой детализацией фотоснимков, наличие точных данных о картографических объектах на территории РФ.

Для реализации сбора и обработки сообщений в социальных сетях (в работе в качестве источника данных выбрана социальная сеть «Вконтакте») был предложен метод, основные этапы которого представлены на рисунке 1. Рассмотрим особенности некоторых из них. Так для поиска сообщений содержащих необходимую информацию были выбраны следующие ключевые слова: «мусор», «свалка», «неприятный запах», «не вывозят». Для реализации

этапа глубокого анализа текста сообщений необходимо в начале было провести предварительное исследование содержания отобранных сообщений о местах хранения ТБО. Итогом которого стал сформированный шаблон поиска, включающей название города «X» (исходная точка путешествия пользователя), «Q» километр (примерная координата место хранения ТБО) или геокоординаты (точное место хранения ТБО), город «Y» (конечная точка путешествия пользователя).

Для реализации получения данных геопозиции в тексте сообщения выявлялись координаты путем ранее рассмотренного поискового шаблона или с использованием технологии прикрепления геопозиции к публикации в «Вконтакте». Анализ полученной информации для одного из регионов РФ показал, что удается получить данные геопозиции о месте несанкционированного места хранения ТБО в сообщениях более чем в 80 процентов случаев.

Для повышения достоверности информации, полученной из сообщений в социальной сети необходимо сравнить ее с информацией (при невозможности дополнить), полученной из альтернативного источника. Для этого в работе предложено использовать фотоснимки местности, найденной по заданным координатам и полученных с помощью ГИС «Яндекс-карты».

В связи с тем, что из большинства сообщений имеется возможность получения координат мест несанкционированного хранения ТБО, то предлагается выполнить интеграцию информации, полученной из текста сообщений в качестве исходных данных для поиска местоположения и сравнения с информацией, полученной из фотоснимка местности.

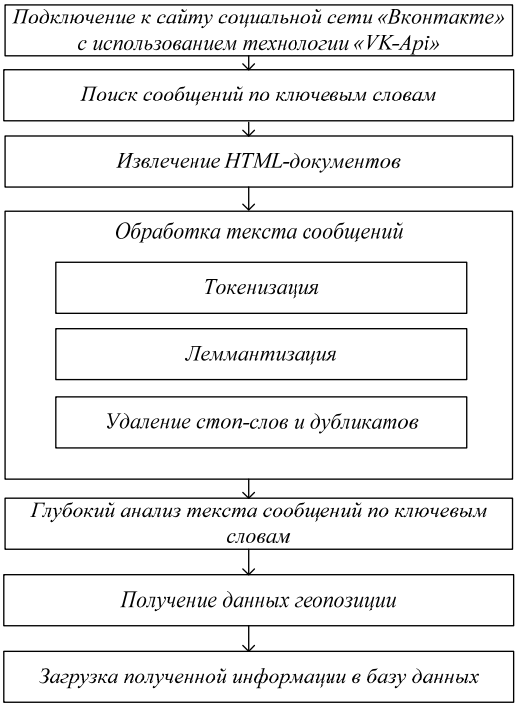


Рис. 1. Метод сбора и обработки текстовой информации о несанкционированных местах хранения бытовых отходов в социальной сети

Для этого та часть публикаций, в которых были выявлены координаты проверяются без дополнительных преобразований немедленно в ГИС, а при наличии приблизительного местоположения требуется выполнить анализ области на фотоснимке в радиусе около 8 километров [15] от указанного места с использованием метода сегментации изображений [7]. Это связано с тем, что такой поиск должен осуществляться исходя из координат не места, где выявлено место хранения ТБО, а откуда возможно его наблюдать.

Необходимость расчета дальности видимости объектов заключается в том, что, в связи со сферичной формой земной поверхности, объекты на большом удалении скрываются за горизонтом, поэтому наблюдатель не может обнаружить место несанкционированного хранения ТБО дальше чем его видимый горизонт (рисунок 2). Расчет дальности видимости объектов производится по формуле:

$$D_k=2{,}08*(\sqrt{e_m}+\sqrt{h_m}), \quad (1)$$

где D_k – дальность видимости объекта; e_m – высота точки наблюдений(м.) (средний рост человека); h_m – высота объекта(м.).

Для расчета дальности видимости были приняты следующие значения параметров: высота точки наблюдения (А) = 1,8 метра, высота объекта (В) будет равна примерно 0,5 - 1 метр.

Для распознавания объектов на фотоснимках из космоса существует множество методов и в работе для распознавания мест хранения ТБО выбран метод сегментации изображений [7], где под сегментацией изображений понимается разделение изображения на отдельные группы пикселей, области, соответствующие одному классу объектов с одновременным определением типа объекта. Наиболее простым решением для поиска ТБО на картографических фотоснимках является описание покрывающих текстур и яркостей пикселей в области рассматриваемого пикселя. Это позволяет распознавать места хранения ТБО на «фоне» фотоснимка, а также путем фильтрации отличить от лесных участков. Метод сегментации изображений представлен алгоритмом машинного распознавания объектов в виде библиотеки TensorFlow с надстройкой Keras [13]. Для обучение распознаванию объектов на фотоснимках была применена модель обучения с учителем. В качестве данных для обучения модели были взяты данные о место-

положении учтенных муниципальными органами несанкционированных местах хранения ТБО. Для обучения модели были применены 2700 фотоснимков местности и 1000 тестовых изображений. По итогам работы модели в 83,3 процентах при распознавании объектов на тестовых изображениях был получен верный результат.

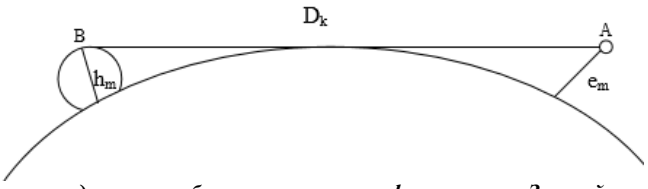


Рис. 2. Карта дальности видимости объекта с учетом сферичности Земной поверхности

Рис. 3. Схема метода обработки изображений

Для проверки эффективности метода было выполнено экспериментальное исследование возможности по выявленным координатам в сообщениях о примерном месте хранения ТБО получать в ГИС «Яндекс-карты» требуемой области на фотоснимке. На рисунке 3 представлено местоположение места, откуда было отправлено сообщение о несанкционированном месте хранения ТБО.

Рис. 4. Фотоснимок местности, полученный по координатам

В результате анализа фотоснимка получен обработанный кадр, на котором изображены распознанные текстуры (рис. 4).

Анализ результатов работы метода показал, что на фотоснимке распознаны три объекта, два объекта из них – лес, они были выделены сплошными прямоугольниками, и один из них объект выделен пунктиром – место хранения ТБО.

В результате работы метода, при успешном нахождении интересующего объекта, фотоснимку присваивается статус «успешно» и в базе данных для сообщения об обнаруженном месте хранения ТБО устанавливается статус «Подтверждено». В работе в качестве СУБД выбран PostgreSQL как эффективный вариант хранения информации в базах данных, реализованный на базе свободного программного обеспечения.

Таким образом в работе предложен подход, направленный на повышение достоверности данных о местах несанкционированного хранения ТБО с использованием информации, полученной из социальной сети и ГИС «Яндекс карты» и обработанной с помощью метода обнаружения мест хранения ТБО в сообщениях социальных сетей и метода сегментации изображений, реализованного в библиотеках машинного распознавания объектов на фотоснимках.

Рис. 5. Результат машинного распознавания объектов

Кроме того, предложенный подход, обеспечивающий подтверждение мест несанкционированного хранения ТБО, обнаруженных в сообщениях социальных сетей и распознанных на фотоснимках, позволяет региональным органам власти вести более качественный их учет и таким образом своевременно решать социально-значимые экологические проблемы регионов.

Список литературы

1.Дорофеев А.В., Марков А.С. Структурированный мониторинг открытых персональных данных в сети Интернет, 2016. 13 с.

2.Хаустов А.П., Редина М.М., Экологический мониторинг, 2023. 543 с.

3.Геоэкология: современные методы исследований: учеб. пособие [Электронный ресурс] / В. Н. Масляев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020.

4.Язиков Е.Г., Шатилов А.Ю. Геоэкологический мониторинг. Учебное пособие для вузов. - Томск: Изд-во 2003. 336 с.

5.О национальном экологическом рейтинге [Электронный ресурс]: [сайт]. – Режим доступа: https://greenpatrol.ru/sites/default/files/default_images/ner_prezentaciya_3mb.pdf – Дата обращения: 02.09.2023.

6.Морозова А.А. Достоверность информации в социальны сетях и критерии ее верификации, Вестник Челябинского государственного университета. 2017. № 6 (402). Филологические науки. Вып. 106. С. 75—83

7.Годунов А.И., Баланян С.Т., Егоров П.С., Сегментация изображений и распознавание объектов на основе технологии сверточных нейронных сетей // Надежность и качество сложных систем 2021. ;№2 С 62-73.

8.РЭО Радар [Электронный ресурс]: [сайт]. – Режим доступа: https://radar.reo.ru [дата обращения 01.09.2023].

9.Воробьев А.А., Еременко В.Т. Метод интеллектуальной обработки информации, полученной из разнородных источников для повышения точности геоэкологического мониторинга окружающей среды // Информационные системы и технологии. 2022. № 3 (131). С. 56-66.

10. Воробьев А.А. Исследование возможности повышения точности геоэкологического мониторинга окружающей среды с использованием метода деревьев классификации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 2. С. 89-93.

11. Воробьев А.А., Еременко В.Т. Метод аналитической обработки информации, полученной из социологических исследований для повышения оперативности геоэкологического мониторинга окружающей среды // Информационные системы и технологии. 2022. № 2 (130). С. 38-46.

12. Воробьев А.А., Еременко В.Т. Алгоритм обработки геоэкологической информации, формируемой датчиками и социальной средой, для повышения достоверности мониторинга состояния атмосферного воздуха // Информационные системы и технологии. 2023. №2. С.5-13

13. Распознавание изображений на Python с помощью TensorFlow и Keras [Электронный ресурс]: [сайт]. – Режим доступа: https://evileg.com/ru/post/619/ [дата обращения 01.09.2023].

14. Поликарпов Д.Д. «Яндекс» - крупнейшая российская поисковая система и интернет-портал // Менеджмент: Лаборатория практик №3. 2014. С.67

15. Ермаков С.В. Особенности определения фактической дальности видимости огней маяков по указанной на карте величине // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова выпуск 5(33) 2015 С.74

Воробьев Андрей Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, сотрудник, awa@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Антошкин Андрей Алексеевич, сотрудник, andrew.3aa@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

APPROACH TO GEOECOLOGICAL MONITORING OF THE ENVIRONMENT USING DATA FROM OPEN SOURCES

A.A. Vorobyov, A.A Antoshkin

An approach has been proposed for collecting and processing information on unauthorized storage sites of solid household waste based on machine learning using text and graphical data obtained from open sources, which enhances the reliability of geoecological monitoring.

Key words: geoecological monitoring, information reliability, geoposition, image segmentation, machine learning.

Vorobyov Andrey Anatolievich, candidate of technical sciences, assistant professor, researcher, awa@mail.ru, Russia, Orel, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation

Antoshkin Andrey Alekseevich, researcher, andrew.3aa@mail.ru, Russia, Orel, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation

УДК 004.724:007.52
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-65-66

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В РЕШЕНИИ ПЛОЩАДНЫХ ЗАДАЧ РОЕМ АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ ЗА СЧЕТ РЕЛЕЙНОЙ СВЯЗИ

А. Ю. Таранов, А. Ю. Остроухов

В статье рассмотрена проблема повышения энергоэффективности при использовании автономных роботов в решении задач, связанных с обработкой больших площадных объектов (сельскохозяйственные земли, лесные массивы, водоемы, территории населенных пунктов и т.п.). Цель работы – поиск новых способов повышения возможностей робототехнических средств. В частности, одной из целей является улучшение такой характеристики, как время автономной работы в расчете на один заряд батареи. Предложен обобщенный метод решения поставленной задачи за счет использования релейной передачи данных. Рассмотрены положительные и отрицательные стороны такого подхода, показана перспективность проведения дальнейших разработок в данном направлении, а также предложены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: передача данных, энергоэффективность, автономные роботы.

Автономные роботы (АР) являются мобильными компонентами в большом числе систем различного назначения. Примерами их применения могут быть:

- мониторинг сельхозугодий при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с целью получения актуальной информации о состоянии посевов [1] и качестве обработки посевных площадей [2],
- дистанционное отслеживание состояния водоемов (как их поверхности [3], так и береговой линии [4]),
- поиск пропавших людей в труднодоступной местности или в условиях стихийного бедствия [5],
- обеспечение общественной безопасности [6],
- создание сетей связи 6G [7].

Одним из критериев эффективности при решении подобных задач являются быстрота получения результата и/или надежность системы, решающей поставленную задачу. В обоих случаях действенным методом повышения эффективности является применение не одиночных АР, а их группы (роя), состоящей из множества относительно недорогих устройств.

При использовании АР (независимо от среды их использования – воздушной, наземной или водной), остро стоит вопрос об обеспечении энергоэффективности их работы. Современные АР, как правило, для своего функционирования используют электроэнергию, однако, все сказанное далее актуально и при использовании органического топлива.

Вопрос энергоэффективности, в первую очередь, связан с тем, что условный коэффициент полезного действия (КПД) при использовании АР напрямую зависит от того, какой процент времени будет тратиться на обслуживание робота: чем больше времени АР будет выполнять свои непосредственные обязанности и чем меньше тратить на перемещение к пункту перезарядки и, собственно, на перезарядку, тем выше будет этот коэффициент. Соответственно, это будет способствовать обеспечению быстроты получения требуемого результата и повышению общей надежности роевой робототехнической системы.

Повышения энергоэффективности работы АР можно достигнуть двумя способами:

- экстенсивным (увеличивая количество используемых ресурсов, без изменения их качества; например, увеличивая время работы АР за счет установки дополнительного аккумулятора),
- интенсивным (улучшая качество используемых ресурсов и/или увеличивая эффективность их применения; например, увеличивая время работы АР за счет снижения энергопотребления при использовании энергосберегающих аппаратных решений и/или за счет использования организационных мер, позволяющих обеспечивать экономию энергии).

С практической точки зрения второй способ более предпочтителен, так как сулит выигрыш экономического характера (нет нужды в приобретении более емких аккумуляторов, возможна покупка более дешевых АР и т.п.), при сохранении получаемых плюсов (так же, как и в первом случае повышается уже упомянутый КПД использования АР). Собственно, целью данной работы и является попытка создать подход, который позволит с помощью мер организационного характера добиться повышения энергоэффективности работы АР, выраженного, в частности, в виде увеличения времени их работы при прочих равных условиях.

Основной расходной статьей в энергопотреблении АР является работа двигателей. Решение данной проблемы лежит в плоскости сложных исследований в области разработки более эффективных двигателей, более емких источников энергии и т.д., хотя частично она может быть решена и организационными методами (например, оптимальным планированием маршрутов перемещения робота). В данной же статье речь пойдет об экономии бортового энергоресурса за счет более эффективного использования средств коммуникации.

По сравнению с потреблением электродвигателей, модули связи на АР можно считать малопотребляющими. Например, модуль передачи видео DJI-5.8VTX имеет мощность до 7 Вт, в то время как электродвигатель Racerstar BR1103 8000KV – до 25-27 Вт (при этом, во-первых, это далеко не самый мощный двигатель и, во-вторых, подобных двигателей на АР может быть несколько). Однако возможность сэкономить 3-5 %% энергоресурса все равно считается привлекательной. Для получения дополнительных преимуществ используется даже, казалось бы, такая незначительная возможность, как сокращение частоты использования средств связи [8].

Перейдем к описанию метода организации энергоэффективной работы роя АР при решении упомянутых площадных задач.

Зависимость энергопотребления от расстояния передачи. В соответствии с уравнением дальности [9] мощность на выходе приемника определяется как:

$$P_r = P_t G_t \eta_t G_r \eta_r [\lambda/(4\pi R)]^2 |V|^2, \quad (1)$$

где P_r – чувствительность приемника; P_t – мощность передатчика; G_t – коэффициент усиления антенны передатчика; G_r – коэффициент усиления антенны приемника; η_t – КПД системы передачи энергии передатчика; η_r – КПД системы передачи энергии приемника; λ – длинна волны; $|V|$ – модуль множителя ослабления поля; R – расстояние между передатчиком и приемником.

Из уравнения дальности (1), полагая, что $|V|=1$, следует, что расстояние между передатчиком и приемником определяется как:

$$R = \lambda/(4\pi R)[G_t \eta_t G_r \eta_r (P_t/P_r)]^{1/2} \quad (2)$$

Допустим, что необходимо обеспечить связь на расстоянии R, используя N однотипных равноудаленных ретрансляторов с чувствительностью приемка P_r и мощностью передатчика P_0, причем $P_0 < P_t$. Полагая, что параметры G_t, η_t, G_r, η_r, для ретранслятора, такие же, как для, рассматриваемых выше передатчика и приемника, получим:

$$R = N\lambda/(4\pi R)[G_t \eta_t G_r \eta_r (P_0/P_r)]^{1/2} \quad (3)$$

Приравняв правые части уравнений (2) и (3) и сократив общие множители, получим:

$$(P_t/P_r)^{1/2} = N(P_0/P_r)^{1/2} \quad (4)$$

Из (4) следует выражение для необходимой мощности передатчика ретранслятора:

$$P_0 = P_t / N^2 \quad (5)$$

Выражение (5) можно считать верхней оценкой мощности передатчика ретранслятора. На практике это значение будет выше. Выражение (5) можно использовать для оценки необходимого количества ретрансляторов при заданной мощности передатчика.

В результате получаем общий вывод: релейный принцип передачи данных при передаче на заданное расстояние энергетически выгодней прямой передачи.

Формализация задачи. Таким образом, задача снижения энергопотребления сводится к построению такой рабочей формации роя АР, которая будет представлять собой цепочку или цепочки, позволяющие роботам ретранслировать сигналы друг друга от крайних АР строя к центру обработки данных и наоборот. Помимо этого, нужно обеспечивать эффективное выполнение роем его основной функции – обработки или исследования некоторой заданной территории (рис. 1).

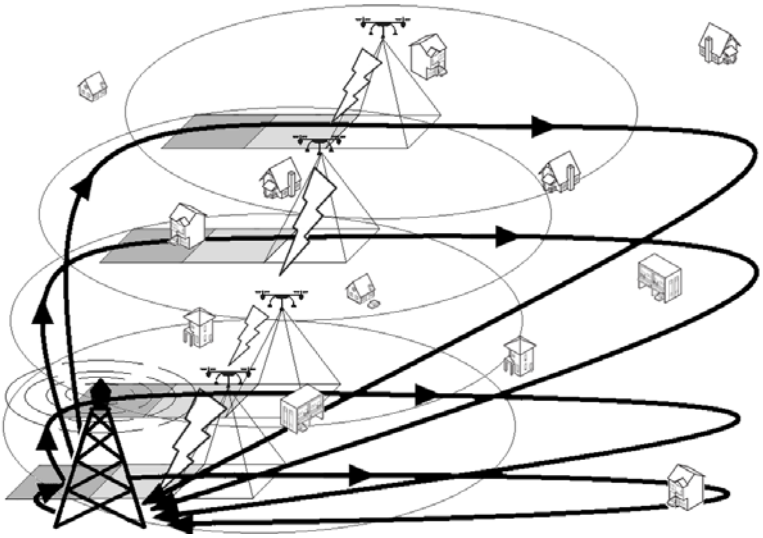


Рис. 1. Общая схема работы роя автономных роботов с коммуникацией по релейной цепочке

Первая задача может быть формализована в виде выражения:

$$f_1(X) = \sum_i [\ ||X_i - X_{i+1}|| \le R\ ], \quad (6)$$

где X – множество АР, составляющих релейную цепочку; R – гарантированный радиус действия средств связи АР.

Для формализации второй задачи необходимо сделать ряд дополнительных уточнений.

Предполагается, что АР может обрабатывать территорию дискретными участками. Например, БПЛА вертолетного типа DJI Mavic 3, имея камеру с углом обзора 84°, может обеспечить с высоты 200 метров съемку территории размером примерно 285x215 метров (по данным Camera Field of View Calculator, omnicalculator.com). Такие параметры позволяют 20-мегапиксельной камере получать различимое изображение фигуры человека, имеющей размер ≈15-20 пикселей, на виде сверху.

Сделаем еще одно допущение. Пусть для АР достаточно лишь производить обработку доверенной ему территории и, не производя трудоемких вычислительных операций на борту, передавать ее результаты в центр обработки данных. Тогда получается, что обрабатываемую территорию можно разбить на небольшие участки (например, 285x215 метров, как в примере выше), и роботу будет достаточно пройти только через точки, представляющие центры таких участков (рис. 2).

Таким образом, решение второй задачи сводится к построению траекторий движения АР роя таким образом, чтобы:

- во-первых, их траектории пересекались минимально,
- во-вторых, для любого АР все время сохранялась прямая связь или связь через других членов роя с центром обработки данных.

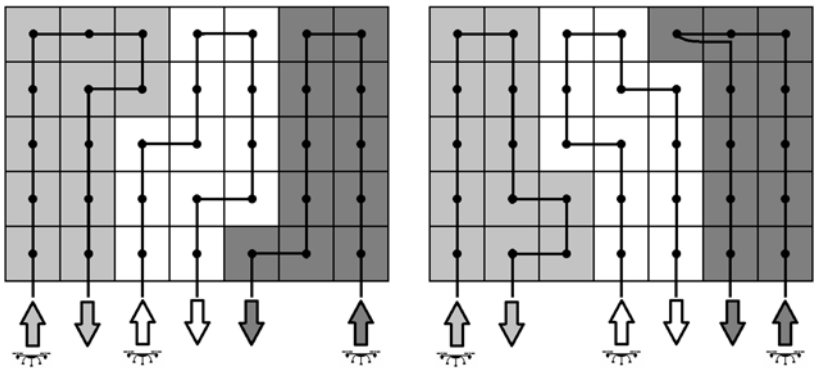


Рис. 2. Разбиение обрабатываемой территории на участки и построение траектории их обхода автономными роботами (слева – оптимальное решение, справа – не оптимальное, но допустимое)

Формализовать решение второй задачи можно следующими выражениями:

$$f_2(X) = \sum_i \sum_j [T(X_i, X_j)], \tag{7}$$

где $T(X_i, X_j)$ – функционал, принимающий значения, равные $t \geq 0$ ($t \square N$), и определяющий факт пересечения траекторий АР X_i и X_j (t соответствует числу пересечений); при этом i и j могут быть равны, что подразумевает учет пересечения своей собственной траектории.

$$f_3(X) = \sum_i [C(X_i)], \tag{8}$$

где $C(X_i)$ – предикат, принимающий значения из множества $\{0, 1\}$ и определяющий наличие связи ($C(X_i)=1$) АР X_i с центром обработки данных или же с любым другим роботом из состава роя, имеющим прямую или опосредованную связь с центром обработки данных.

Фактически для эффективного решения задачи обработки территории роем АР требуется:

- достичь максимально возможной длины цепочки АР, при условии, что соседние в ней роботы будут в пределах досягаемости друг друга посредством выбранного типа связи, то есть:

$$f_1(X) \rightarrow max; \tag{9}$$

- провести каждый из АР по траекториям (L) максимальной протяженности в пределах обрабатываемой территории, причем с минимальным пересечением траекторий разных АР и сохранением связи, то есть с выполнением условий:

$$\begin{gathered} \sum_i [L(X_i)] \rightarrow max, \\ f_2(X) \rightarrow min, \\ f_3(X) = |X|. \end{gathered} \tag{10}$$

На приведенной выше иллюстрации показан пример обрабатываемой территории в виде прямоугольника, однако описываемый подход может быть применен и к участкам произвольной формы (рис. 3).

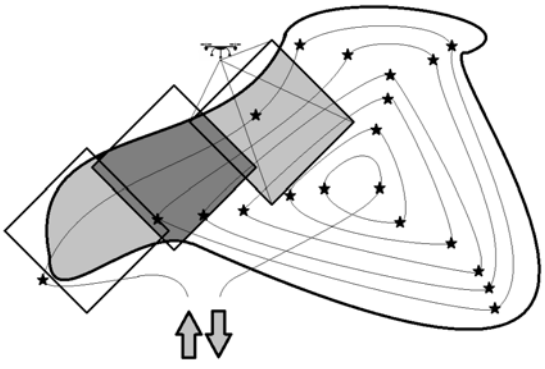


Рис. 3. Обработка территории произвольной формы с движением по сложной траектории, построенной по опорным точкам

Для прокладывания траекторий при этом могут использоваться опорные точки, между которыми строится траектория (используя решение задач для машины Дубинса [10] или же сплайновые кривые [11]).

Дополнительные соображения. В качестве дополнения можно добавить соображения следующего характера, позволяющие улучшить показатели энергоэффективности в решении площадных задач:

1. При использовании БПЛА, рассмотренные ранее в качестве примера участки обрабатываемой территории размером 285х215 метров могут быть пройдены на обычной для квадрокоптера скорости 15 м/с за 14-19 секунд каждый. Соответственно, если АР, например, ведет аэрофотосъемку, он должен осуществлять передачу 1 фото раз в 14-19 секунд. При использовании, например, системы передачи видео DJI O3 Enterprise Transmission, обеспечивающей скорость передачи до 15 Мб/с, рассматриваемый подход сможет обеспечить работу в релейном режиме всего от 30 до 57 АР (исходя из размера 20-мегапиксельного фото, сжатого в формате JPEG, в 5-7 Мб). Этого может быть недостаточно для решения масштабных задач. Если же учесть, что заявленные характеристики приемопередающего оборудования указываются для идеальных условий и в реальности число поддерживаемых АР может оказаться в разы меньше, необходимо предусмотреть реализацию параллельной передачи данных, используя две и более релейных цепочек (рис. 4).

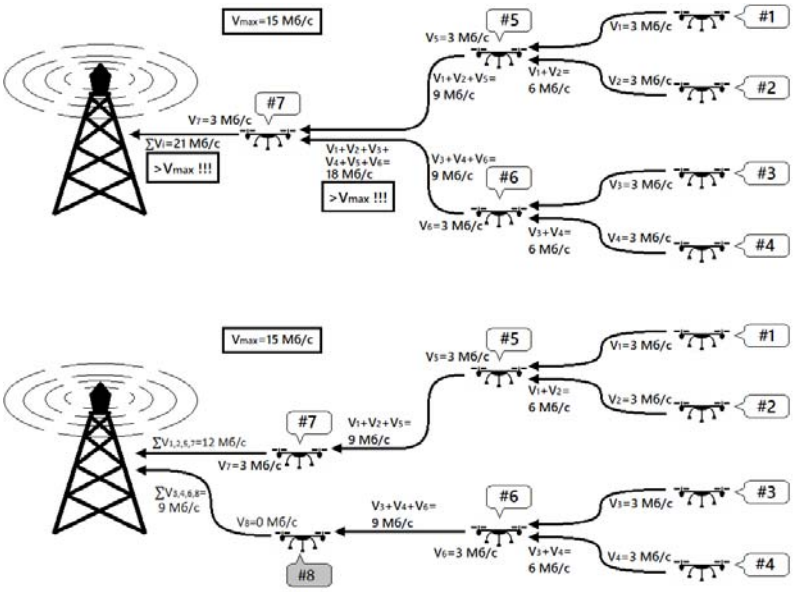


Рис. 4. Пример организации параллельных цепочек передачи данных за счет дополнительного АР, выполняющего только роль ретранслятора

В общем случае замечание справедливо не только для БПЛА, но для других типов АР.

2. С целью обеспечения большего покрытия обрабатываемой территории за один выход роя, базовая станция (центр обработки данных) может быть мобильной. Тогда начало и конец маршрута роя могут не совпадать, что в может дать искомое увеличение покрытия обрабатываемой за раз территории. При невозможности организовать мобильность центра обработки данных имеет смысл применять более дорогие и технически более совершенные АР, выполняющие роль коллекторов данных от обычных АР роя с целью их дальнейшей ретрансляции на большое расстояние в центр обработки данных (рис. 5).

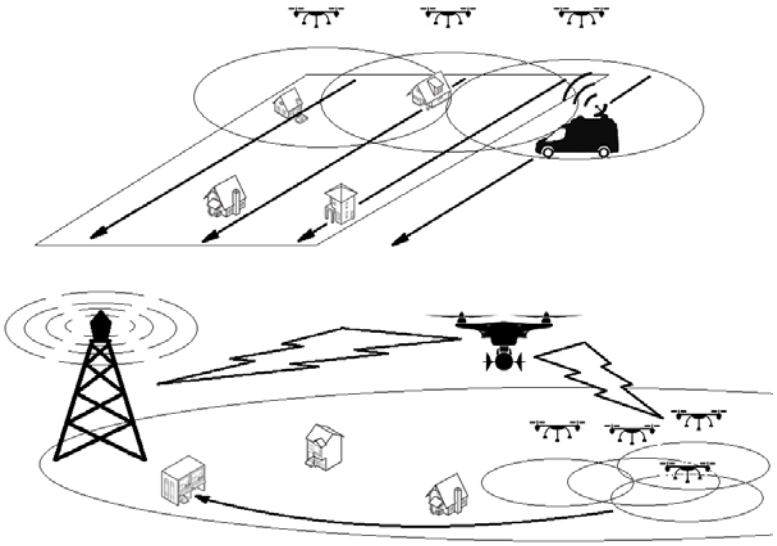


Рис. 5. Увеличение покрытия обрабатываемой территории, используя мобильную базовую станцию или отдельный АР-ретранслятор

3. В качестве одной из стратегий поведения роя, вероятно, имеет смысл организовывать построение траекторий АР таким образом, чтобы каждый робот изначально удалялся на максимально возможное расстояние, попутно обрабатывая попадающиеся на его пути участки, а потом возвращался по траектории, строящейся параллельно, так же продолжая обработку проходимых участков. Это позволит более эффективно обрабатывать заданную территорию, в большей степени соответствуя критериям, описанным выражениями (6)-(10).

4. Во главу угла в данной статье было поставлено достижение более высокой энергоэффективности. Но при этом стоит иметь в виду тот факт, что «легковесные» в плане вычислительной сложности алгоритмы, которые бы могли исполняться на борту АР для вычисления траекторий движения, не вызывая при этом чрезмерного потребления энергии бортовым процессором, могут давать результаты, которые будут отличаться от оптимума. Поэтому, в случае если это действительно необходимо, может быть рассмотрен вариант предварительной подготовки траекторий в центре обработки данных (для авиации вообще и для БПЛА в частности это является распространенной практикой). При таком подходе можно применять более сложные и более трудоемкие алгоритмы. Да, их применение может занять больше времени, но, во-первых, в таком случае нет или почти нет ограничения по времени принятия решения, а во-вторых, эффективные по результативности, но вычислительно сложные алгоритмы могут быть «ускорены», например, за счет распараллеливания [12].

Оценка предложенного подхода. Рассмотрим положительные и отрицательные стороны предложенного подхода.

Из его полезных качеств можно выделить:

- снижение энергозатрат на осуществление как коммуникации в пределах роя АР (если есть такая необходимость), так и при связи с «центром»,
- вызванное этим увеличение времени работы АР на одном заряде (заправке) и, соответственно, увеличение КПД применения робототехнических средств для решения поставленных задач,
- снижение общей стоимости системы за счет эксплуатации более дешевых АР, построенных на более дешевых компонентах (например, с применением недорогих, маломощных приемопередатчиков),
- увеличение уровня информационной безопасности за счет уменьшения зоны покрытия, в которой к коммуникационной сети роя смогут получить доступ потенциальные злоумышленники,
- снижение уровней т.н. «электромагнитного загрязнения» [13].

К относительным недостаткам предлагаемого подхода относятся:

- «бутылочное горлышко» в виде пропускной способности отдельно взятых АР, играющих роль ретрансляторов – в случае, если канал связи имеет малую пропускную способность и/или же объем передаваемых данных велик, это может привести к невозможности организации работы роя, состоящего из нужного числа АР. В таком случае придется увеличивать число АР для организации параллельных релейных цепочек передачи данных. Возможно, это придется делать ценой уменьшения числа АР, занятых решением основной задачи;
- задержки при организации ретрансляции данных. Проведенные численные эксперименты показали, что снижение энергопотребления приводит к определенному увеличению временных задержек при передаче данных (рис. 6). В ряде применений это может быть не очень важным фактором, и дополнительная задержка порядка десятков или сотен миллисекунд может быть признана несущественной, но нужно понимать, что это далеко не всегда так. В данном случае необходимо трезво оценивать ситуацию и искать приемлемый компромисс между экономией в энергопотреблении и уровнем задержки в передаче информации, варьируя число АР в релейной цепочке.

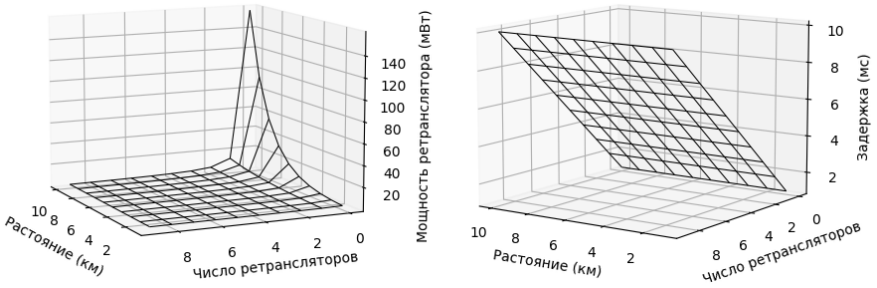


Рис. 6. Зависимости необходимой мощности приемопередающего оборудования (слева) и временных задержек (справа) от расстояния передачи данных и числа ретрансляторов в релейной цепочке

Общие выводы. Предложенный подход обладает значительным количеством плюсов и, несмотря на имеющиеся минусы, потенциально позволяет добиться повышения энергоэффективности использования робототехнических средств в значительной части случаев частного применения.

Планируемые исследования. В ходе дальнейших исследований предполагается:

- разработка вычислительно «легковесных» бортовых алгоритмов построения траекторий с минимальным отклонением от реального оптимума,
- разработка алгоритмов, учитывающих временное нахождение АР вне поля видимости роя и с эпизодической передачей собранных данных.

Список литературы

1. Трубицын, Н. В. Мониторинг сельскохозяйственных посевов с помощью беспилотных летательных аппаратов / Н. В. Трубицын, В. Е. Таркивский, М. А. Белик // Евразийский союз ученых. 2018. № 11-2(56). С. 26-31. EDN YRQKCT.

2. Мониторинг посевов озимой пшеницы с применением беспилотной аэрофотосъёмки и оптического датчика GreenSeeker® rt200 / С. В. Железова, А. А. Ананьев, М. В. Вьюнов, Е. В. Березовский // Вестник Оренбургского государственного университета. 2016. № 6(194). С. 56-61. EDN WIQSJL.

3. Овчинникова Н.Г. Использование беспилотных летательных аппаратов в мониторинге водных объектов / Н. Г. Овчинникова, И. А. Ниценко // Экономика и экология территориальных образований. 2022. Т. 6, № 1. С. 87-94. DOI 10.23947/2413-1474-2022-6-1-87-94. EDN OEWGLA.

4. Лучников, А. И. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов / А. И. Лучников, Ю. С. Ляхин, А. П. Лепихин // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 37-46. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-1-3. EDN YUVQIQ.

5. Середа К.А. Повышение эффективности поиска людей в экосистемах с использованием летательного аппарата в комплексе с тепловизионной техникой / К. А. Середа, О. Д. Навроцкий // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2020. № 2(48). С. 205-211. EDN EBOZYF.

6. Макушенко Е.С. Перспективные сферы применения беспилотных летательных аппаратов / Е. С. Макушенко // Приоритеты новой экономики: энергопереход 4.0 и цифровая трансформация: Сборник тезисов всероссийской научно-практической конференции, Москва, 15 декабря 2021 года / Под редакцией И.М. Степнова, Ю.А. Ковальчук. – Москва: Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации, 2022. С. 170-173. EDN PPRXSW.

7. Девяткин, Е. Е. Анализ возможности построения трехмерной архитектуры сетей 6G / Е. Е. Девяткин, М. В. Иванкович, А. С. Пастух // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2021. Т. 12, № 6. С. 91-99. EDN ILRSUQ.

8. Daas M.S., Benahmed Z., Chikhi S. An Optimized Energy-Efficient Mission-Based Routing Protocol for Unmanned Aerial Vehicles. In: Chikhi, S., Amine, A., Chaoui, A., Saidouni, D., Kholladi, M. (eds) Modelling and Implementation of Complex Systems. MISC 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, 2021. vol 156. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58861-8_5.

9. Распространение радиоволн и работа радиолиний [Текст] : [Учеб. пособие для вузов связи] / А. И. Калинин, Е. Л. Черенкова. Москва: Связь, 1971. 439 с.

10. Хабаров С.П. Геометрический подход к решению задачи для машин Дубинса при формировании программных траекторий движения / С. П. Хабаров, М. Л. Шилкина // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 653-663. DOI 10.17586/2226-1494-2021-21-5-653-663. EDN JMOTQT.

11. Кравченко П.П. Интерполяция сплайнами на основе дельта-преобразований второго порядка / П. П. Кравченко, Ю. М. Бородянский, А. Ю. Таранов // Известия ТРТУ. 2003. № 1(30). С. 69. EDN KUFWMF.

12. Клименко А.Б. Методы распараллеливания имитации отжига при децентрализованном решении задачи составления расписания с определением минимального количества ресурсов / А. Б. Клименко, В. В. Клименко, А. Ю. Таранов // Естественные и математические науки в современном мире. 2014. № 22. С. 11-18. EDN SMGRRT.

13. Махасин Фра. Электромагнитное загрязнение от радиочастотных источников и их воздействие на человека / Махасин Фра, В. Беляев, И. Леонисова // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2020. № 6(197). С. 70-75. DOI 10.22184/1992-4178.2020.197.6.70.74. EDN GNDLHX.

Таранов Антон Юрьевич, инженер, mailfortexas@mail.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,

Остроухов Андрей Юрьевич, конструктор 1 категории, a-ostrouhov@yandex.ru, Россия, Таганрог, Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. акад. А. В. Каляева ЮФУ

INCREASING ENERGY EFFICIENCY IN AREA-BASED TASKS RESOLVING BY AN AUTONOMOUS ROBOTS SWARM THROUGH RELAY COMMUNICATIONS

A.Yu. Taranov, A.Y. Ostroukhov

This paper considers the problem of increasing the energy efficiency of autonomous robots usage in solving tasks related to the processing of large area objects (agricultural lands, forest areas, water bodies, settlement territories, etc.). The objective of the work is to find new ways to improve the capabilities of robotic vehicles. In particular, one of the goals is to improve such a characteristic as autonomous operation time per one battery charge. A generalized method for solving the problem through the using of relay data transmission is proposed. The profits and disadvantages of this approach are considered, the prospects for further developments in this area are shown, and directions for next research steps are suggested as well.

Key words: data transmission, energy efficiency, unmanned robots.

Taranov Anton Yurievich, engineer, mailfortexas@mail.ru, Russia, Rostov-on-Don, Federal Research Center The Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,

Ostroukhov Andrey Yurievich, category 1 engineering designer, a-ostrouhov@yandex.ru, Russia, Taganrog, Southern Federal University, Scientific Research Institute of Multiprocessor Computing Systems

УДК 004.942
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-71-72

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ УЯЗВИМОСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ СВЯЗИ

М. М. Добрышин, А. А. Горшков, А. А. Струев, Ю. А. Кирикова

Процесс обеспечения информационной безопасности с практической точки зрения заключается в выявлении и устранении уязвимостей защищаемой сети связи. Существующие решения позволяют с требуемой достоверностью осуществлять указанный процесс, однако поиск уязвимостей требует временных затрат и способен негативно влиять на процесс предоставления услуг связи. С целью обоснованного использования ресурсов в статье на основании проведенного анализа выявлены и сгруппированы в три группы основные факторы, влияющие на возникновение новых уязвимостей в сети связи. Контроль изменения выявленных факторов позволит с одной стороны своевременно выявлять ранее не характерные для сети уязвимости, а с другой стороны не затруднять работу сети связи.

Ключевые слова: уровень информационной безопасности корпоративной сети связи, уязвимость, динамические условия.

Современный этап развития теории информационной безопасности (ИБ) основывается на ряде взаимоувязанных понятиях, особое место среди которых занимают: нарушитель и угрозы ИБ, а также уязвимость системы или сети. С точки зрения системного анализа, первые два понятия относятся к внешней среде, а уязвимость характеризует группу программного обеспечения, установленного на средствах обработки, хранения и передачи информации, и программного обеспечения, отвечающего за процесс сетевого взаимодействия защищаемой системы или сеть связи. В дальнейшем, в качестве защищаемой системы (сети) связи будет рассмотрена корпоративная сеть связи (КСС).

Анализ актуальных документов регламентирующих предметную область [1-6], показывает, что обеспечение ИБ КСС строится на двух основных документах – модели нарушителя и модели угроз ИБ. Указанные модели носят гипотетический характер – оформленные предположения специалистов, описывающие возможности (модель нарушителя ИБ) и цели (модель угроз ИБ) нарушителя.

Возможности нарушителя – мера усилий нарушителя для реализации угрозы безопасности информации, выраженная в показателях компетентности, оснащенности ресурсами и мотивации нарушителя [1].

Гипотетический характер модели нарушителя заключается в предположительном описании нарушителя, например [1]: внешние нарушители, представлены специалистами высшей квалификации, специализирующимися в области разработки и анализа средств защиты, и способными: самостоятельно осуществлять создание методов и средств реализации угроз ИБ и выполнять их реализацию; использовать для реализации угроз ИБ недокументированные возможности специального программного обеспечения и внедренные в технические средства электронные устройства негласного получения информации; выполнять анализ сигналов линейной передачи и сигналов. Таким образом, нарушитель наделен всеми возможными навыками и умениями, т. е. рассматривается «наихудший случай».

Угроза безопасности информации – совокупность условий и факторов, создающих потенциальную или реально существующую опасность нарушения безопасности информации [1].

Рассмотрение общедоступных моделей угроз ИБ [1] показывает, что все преднамеренные угрозы разделяются на угрозы нарушения конфиденциальности – разглашение, утечка информации ограниченного доступа; угрозы нарушения целостности – искажение, подмена, уничтожение информационных, программных и других ресурсов, а также фальсификация (подделка) документов; угрозы нарушения работоспособности (доступности) – дезорганизация работы, блокирование информации, нарушение технологических процессов, срыв своевременного решения задач. Основываясь на рассмотренных документах, следует вывод о том, что, модели угроз ИБ описывают цели потенциального нарушителя, но не описывают порядок их достижения.

Фактическая защита элементов КСС (средств обработки, хранения и передачи информации) направлена не на противодействие нарушителю и угрозам ИБ, а на защиту от известных видов компьютерных атак (КА) и устранение известных уязвимостей элементов КСС. Например, для защиты от вредоносного программного обеспечения (ВПО) применяют антивирусные средства. Как видно из примера одно средство защиты от КА способно устранить угрозы нарушения целостности, доступности или конфиденциальности обрабатываемой информации потенциально создаваемой ВПО.

Для объектов критической инфраструктуры под компьютерной атакой понимается целенаправленное воздействие программных и (или) программно-аппаратных средств *на объекты критической информационной инфраструктуры, сети связи*, используемые для организации взаимодействия таких объектов, в целях нарушения и (или) прекращения их функционирования и (или) создания угрозы безопасности обрабатываемой такими объектами информации [7].

Объекты критической информационной инфраструктуры – информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети, автоматизированные системы управления субъектов критической информационной инфраструктуры [7].

Автоматизированная система управления - комплекс программных и программно-аппаратных средств, предназначенных для контроля за технологическим и (или) производственным оборудованием (исполнительными устройствами) и производимыми ими процессами, а также для управления такими оборудованием и процессами [7].

Опираясь на данные определения, следует вывод о том, что модель угроз ИБ рассматривая свойства защищаемой информации, не учитывает свойства КСС, а также технических средств, с помощью которых осуществляется обработка, хранение и передача защищаемой информации.

Понятие *уязвимость ИБ* в широком смысле понятия охватывает конструктивные особенности (ошибки, упущения) средств обработки, хранения и передачи информации, а также недостатки в проекте или реализации КСС, включая меры обеспечения ИБ, которыми способен воспользоваться злоумышленник, путем воздействия физиче-

скими полями и компьютерными атаками, с целью воздействия на активы организации или ее функционирование [1, 8].

Основные факторы, определяющие динамичность поверхности защиты корпоративной сети связи. С целью противодействия КА и устранения уязвимостей применяют программные, аппаратно-программные, аппаратные средства, а также организационные, организационно-технические и правовые механизмы защиты от компьютерных атак (СМЗ КА) [9], объединенные в стратегии информационной безопасности. В зависимости от объекта защиты, СМЗ КА обеспечивают безопасность информации, информационной технологии или КСС. Объединение всех стратегии ИБ определяют политику ИБ КСС [5, 10].

Организационно-технически все СМЗ КА объединяются в систему обеспечения информационной безопасности (СОИБ). СОИБ – совокупность сил обеспечения ИБ, осуществляющих скоординированную и спланированную деятельность, и используемых ими средств обеспечения информационной безопасности [10, 11]. В настоящее время средства обеспечения информационной безопасности или средства защиты от компьютерных атак, объединяют семнадцать групп средств [12].

Формирование количественно-качественного состава СОИБ базируется на моделях нарушителя и угроз ИБ, результатах тестов, экспериментов и практического опыта противодействия КА (в том числе на основании результатов расследования инцидентов ИБ т.е. успешных КА), результатов сопоставления ценности защищаемой информации или ущерба от негативных действий над ней или КСС и затратами на эксплуатацию СОИБ, а также предоставляемыми (выделяемыми) СЗ КА вычислительными и иными ресурсами элементов КСС.

При допущении, о том, что на момент ввода КСС в эксплуатацию, СОИБ обеспечивает ее защиту от всех известных видов КА, то инциденты ИБ вызваны двумя основными факторами (преднамеренные действия доверенных пользователей (инсайдеров) не рассматриваются):

– совершенствование и разработка новых средств и способов реализация различных видов компьютерных атак (КА);

– изменением состава применяемого телекоммуникационного оборудования (ТО) и программного обеспечения (ПО).

Совершенствование (разработка новых) видов КА для нарушителя ИБ включает анализ применяемых технических и программных решений, выявлении новых уязвимостей и нахождении условий, при которых эти уязвимости, возможно, эксплуатировать и непосредственно программная реализация КА. Исходя из этого, нарушитель несет финансовые и временные затраты. Причем эффективность разрабатываемых перспективных видов КА носит вероятностный характер и подразумевает нахождение в стационарном состоянии атакуемого объекта, что на практике при длительной разработке КА маловероятно.

Второй фактор позволяет нарушителю ИБ достигать цели воздействия с помощью имеющихся средств и способов реализации КА за счет появления новых для КСС уязвимостей (упущений) в том числе и в СОИБ, но известных в практике защиты от КА, что позволяет сократить (затраты на модернизацию или адаптацию) или избежать затрат.

Для устранения потенциально возникающих уязвимостей, целесообразно первоначально определить основные причины изменения поверхности защиты из-за изменения состава ТО и ПО; сопоставить их с известными стратегиями реализации КА, после чего сформулировать пути и механизмы, обеспечивающие достижение требуемого уровня ИБ.

Поверхность защиты – взаимоувязанная совокупность уязвимостей объекта защиты, средств и механизмов защиты и защищаемых активов [13].

Стратегия реализации КА – последовательность эксплуатации уязвимостей, позволяющая достичь нарушителю цели применения КА.

Изменение состава КСС вызвано с одной стороны требованиями пользователей КСС к количеству предоставляемых услуг связи, с другой стороны особенностями эксплуатации ТО и ПО, но все изменения потенциально являются причинами появления уязвимостей и изменяют поверхность защиты КСС (рис. 1).

Пользовательская (клиентская) составляющая:

1.Изменение количества пользователей КСС приводит к изменению количества используемого ТО, изменению настроек телекоммуникационного оборудования и используемых вычислительных ресурсов.

2.Появление новых узлов КСС, в том числе мобильных пользователей влечет изменение архитектуры (топологии) сети, появлению нового ТО и изменению настроек применяемого ТО.

3.Перемещение пользователей различной категории важности между узлами КСС и предоставление им требуемого набора услуг связи (видеоконференцсвязь, телефония, обмен сообщениями) приводит к изменению информационных потоков, архитектуры (топологии) КСС.

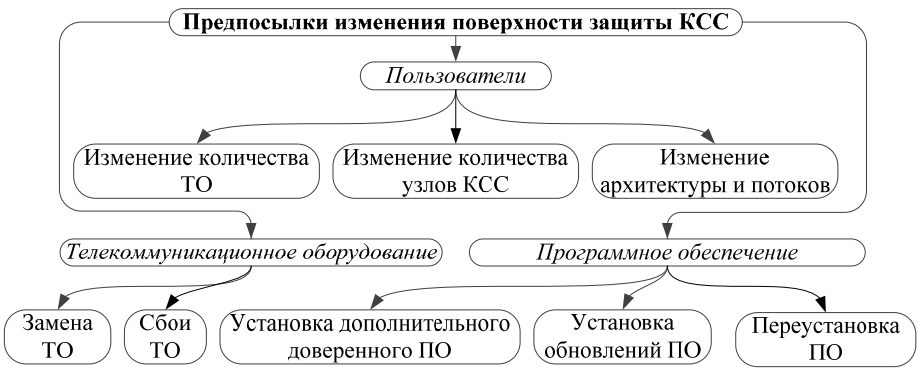


Рис. 1. Факторы определяющие динамические условия функционирования КСС

Телекоммуникационная составляющая:

4. В ходе эксплуатации ТО требует планового технического обслуживания или ремонта, требующего его замены на идентичное или аналогичное оборудование.

5. Эксплуатационные сбои ТО способны возвращать заводские настройки.

Программная составляющая:

6. Обновление применяемого ПО до актуальных версий, потенциально является источником новых уязвимостей, а так же способно нарушить совместимость обновляемого ПО или создать условия для появления новых уязвимостей у другого применяемого ПО.

7. Обновление применяемого ПО может стать источником для компилирования вредоносного ПО из нескольких обновлений различного ПО, полученного, в том числе из доверенных источников.

8. Переустановка ранее применяемого доверенного ПО, вызванная выходом ПО из строя из-за неправильных действий пользователя, сбоями аппаратной части или воздействием вредоносного программного обеспечения, без конфигурирования согласно профиля ИБ.

9. Установка доверенного ПО, ранее не применяемого потенциально способствует появлению новых уязвимостей, в том числе у ранее установленного ПО.

10. Применение концептуально нового ТО и ПО (например, применение терминалов мультисервисных услуг связи) требует оценки уровня ИБ не только конкретного оборудования, но и изменения моделей нарушителя и угроз, что влечет к изменению состава применяемых средств и механизмов защиты.

Перечисленные факторы влияют не только на применяемое телекоммуникационное оборудование и программное обеспечение, но и на СМЗ КА входящие в состав СОИБ.

Обобщая сущность указанных факторов, концептуально можно выделить два основных направления, изучение которых позволит прогнозировать возможное изменение (снижение) уровня ИБ КСС:

Действия легальных пользователей КСС, потенциально влияющих на изменение поверхности защиты КСС: изменение штата (1, 2, 10); перемещение пользователей (3, 8, 10).

Комплекс мероприятий проводимых инженерно-техническим персоналом с применяемым телекоммуникационным оборудованием и программным обеспечением: развитие (модернизация, совершенствование, восстановление или ремонт ТО (4, 5)) телекоммуникационной инфраструктуры и программного обеспечения (обновление, установка новых версий, переустановка (6-10)) потенциально влияющие на появление.

Анализ работ описывающих прогнозирование изменения количественно-качественного состава применяемого ТО и ПО (1, 2) [14, 15] показывает, что изменение количества средств концептуально связанно с изменением численности пользователей (численность увеличилась – увеличилось количество ТО, количество предоставляемых услуг расширилось – увеличилось количество ТО и ПО), однако состав применяемого ТО и ПО изменяется и при квази-стабильном штате. Указанные изменения вызваны, в том числе наличием текущего некомплекта, а также постепенным устареванием ТО (рис. 2).

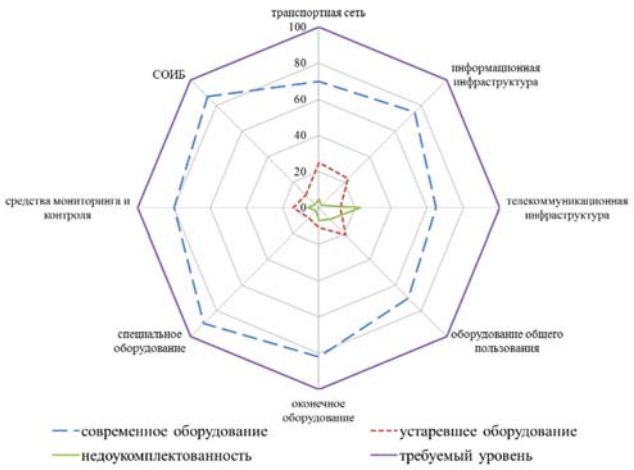


Рис. 2. Вариант представления структуры применяемого оборудования в КСС

Возможные переходы из одного класса в другой (современное, устаревшее или недостающее оборудование) показаны на рисунке 3.

2.1

– обновление

3.1

1.3 – утилизация

2.3

1.2 – устаревание

Рис. 3. Модель изменения структуры применяемого оборудования в КСС

Вопросы изменения численности, в том числе перемещение пользователей между узлами КСС, предоставление им требуемых услуг связи (3) и соответственное изменение поверхности защиты рассматривались в [16].

Факторы, определяющие надежность ТО и ПО, а также и вероятностные характеристики эксплуатационных отказов (4, 5) рассматривались в [17, 18].

Задачи проверки обновлений и корректности работы ПО после установки обновлений (6, 7) носят в большей эвристический (прикладной) характер и в настоящее время достаточно успешно решаются, например в [18].

Корректность правильной настройки переустановленного ранее применяемого доверенного ПО (8) возможно известными программными решениями.

Задачи изменения поверхности защиты элементов КСС при установке нового программного обеспечения или средств обработки, хранения и передачи информации (9, 10), рассматривались в [19, 20].

Таким образом, частные задачи по оценке и обеспечению требуемого уровня ИБ элементов КСС, при изменении ПО и ТО с определенными ограничениями и определенной степенью приближения решены, однако указанные решения не позволяют оценить текущего уровня ИБ КСС.

Список литературы

1. Методический документ. Методика оценки угроз безопасности информации / Утвержден ФСТЭК России 5 февраля 2021 г. – Москва – 2021. – 83 с.

2. Методический документ. Методика тестирования обновлений безопасности программных, программно-аппаратных средств / Утвержден ФСТЭК России 28 октября 2022 г. – Москва – 2022. – 16 с.

3. Методический документ. Методика оценки уровня критичности уязвимостей программных, программно-аппаратных средств / Утвержден ФСТЭК России 28 октября 2022 г. – Москва – 2022. – 11 с.

4. ГОСТ Р 56045-2021. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Рекомендации по оценке мер обеспечения информационной безопасности. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 101 с.

5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002-2021. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Свод норм и правил применения мер обеспечения информационной безопасности. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 74 с.

6. ГОСТ Р 59547-2021. Защита информации. Мониторинг информационной безопасности. Общие положения. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 15 с.

7. Федеральный закон Российской Федерации № 187 от 26 июля 2017 г. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Принят Государственной Думой 12 июля 2017 г. Одобрен Советом Федерации 19 июля 2017 г.

8. ГОСТ Р 56546-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 8 с.

9. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 5 декабря 2016 г. №646.

10. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 28 с.

11. ГОСТ Р 53110-2008. Система обеспечения информационной безопасности сети связи общего пользования. Общие положения. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 23 с.

12. Приказ от 22 сентября 2020 г. № 486. Об утверждении классификатора программ для электронных вычислительных машин и баз данных / Министерство Цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

13. Белов А. С., Добрышин М. М., Шугуров Д. Е. Функциональный подход к комплексной оценке уровня информационной безопасности элемента корпоративной сети связи / Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика : – 2023. – № 3. – С. 24-33.

14. Белов А.С., Добрышин М.М., Горшков А.Н., Мазур В.В. / Методика определения объема дополнительных средств и ресурсов для устойчивого функционирования корпоративной сети связи в условиях информационно-технических воздействий / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 101-105.

15. Белов А.С., Добрышин М.М., Горшков А.Н., Шугуров Д.Е. Предложение по определению эксплуатационной надежности программного обеспечения сложных технических систем / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 143-148.

16. Анисимов В.Г., Гречишников Е.В., Белов А.С., Скубьев А.В., Добрышин М.М. Способ моделирования процессов управления и связи на распределенной территории / Патент на изобретение RU 2631970 C , 29.09.2017. Заявка № 2016144636 от 14.11.2016.

17. Белов А. С., Добрышин М. М. Предложение по удаленному мониторингу программных средств автономных комплексов связи / Авиакосмическое приборостроение. 2021. № 6. С. 13-20.

18. Белов А. С., Добрышин М. М., Шугуров Д. Е., Свечников Д. А. Предложение по контролю безопасности программного обеспечения при периодических обновлениях / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 2. С. 133-137.

19. Shibahara, T., Yagi, T., Akiyama, M., Chiba, D., Yada, T.: Efficient dynamic malware analysis based on network behavior using deep learning, 2016. p. 1–7.

20. Белов А.С., Добрышин М.М., Шугуров Д.Е. Научно-методический подход к оцениванию качества систем обеспечения информационной безопасности / Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 11. С. 34-40.

Добрышин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, сотрудник, Dobrithin@ya.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Горшков Алексей Николаевич, канд. техн. наук, сотрудник, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Струев Александр Анатольевич, канд. техн. наук, сотрудник, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

Кирикова Юлия Андреевна, сотрудник, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

FACTORS AFFECTING THE OCCURRENCE OF VULNERABILITIES OF INFORMATION SECURITY OF THE CORPORATE COMMUNICATION NETWORK

M.M. Dobryshin, A.A. Gorshkov, A.A. Struyev, Yu.A. Kirikova

The process of ensuring information security from a practical point of view is to identify and eliminate vulnerabilities of the protected communication network. Existing solutions allow the specified process to be carried out with the required reliability, however, the search for vulnerabilities requires time and can negatively affect the process of providing communication services. For the purpose of reasonable use of resources in the article, based on the analysis carried out, the main factors influencing the emergence of new vulnerabilities in the communication network are identified and grouped into three groups. Monitoring the changes in the identified factors will allow, on the one hand, to timely identify vulnerabilities that were not previously characteristic of the network, and on the other hand, not to complicate the operation of the communication network.

Key words: information security level of corporate communication network, vulnerability, dynamic conditions.

Dobryshin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, employee, Dobrithin@ya.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Gorshkov Alexey Nikolaevich, candidate of technical sciences, employee, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Struyev Alexander Anatolyevich, candidate of technical sciences, employee, Russia, Oryol, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Kirikova Yulia Andreevna employee, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation

УДК 629.7.015
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-75-76

КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОАГЕНТНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

О.В. Есиков, А.В. Данилов, М.С. Земляницын

Для гарантированного качества результата решения задачи построения маршрута движения летательного аппарата с учетом рельефа местности предложено комплексное использование многоагентных алгоритмов стохастического поиска. Для формирования базового варианта маршрута движения летательного аппарата обосновано применение метода динамики формирования рек. Получение рационального маршрута движения летательного аппарата предложено осуществлять на основе полученного базового с применением метода роя частиц.

Ключевые слова: планирование маршрута, многоагентный алгоритм.

Задача планирования маршрута решается перед полетом летательного аппарата (ЛА) и является частью этапа предполетной подготовки [1]. В качестве исходных данных задачи задаются значения координат исходной и конечной точек маршрута, карта высот рельефа местности, высота полета ЛА, число ППМ N. Планирование маршрута движения ЛА сводится к нахождению значений координат ППМ, обеспечивающих экстремальное значение принятого показателя эффективности.

В работах [2-5] предложена математическая модель оценки качества маршрута движения ЛА и предложен метод ее решения на основе применения метода роя частиц (МРЧ) с островной схемой организации вычислений.

Алгоритм метода роя частиц (МРЧ) представляет собой многошаговый процесс перемещения частиц в многомерном пространстве поиска решения, размерность которого определяется заданным числом ППМ маршрута [5, 6]. Направление движения частиц определяется их текущим положением, лучшим положением частиц на предыдущих шагах, а также положением лучшей в смысле критерия оптимизации частицы в рое.

В связи с тем, что МРЧ является методом локальной оптимизации, основанном на стохастическом поиске, даже с островной схемой организации вычислений качество получаемого решения в достаточно сильной степени зависит от результатов начальной инициализации алгоритма.

Использование МРЧ позволяет получить рациональный вариант маршрута движения ЛА. Перед решением задачи необходимо задать ее размерность и параметры алгоритма (число роев, размер роя, число итераций, число шагов в итерации). В работе [5] экспериментально получены аппроксимирующие зависимости для определения значений параметров алгоритма для произвольного числа ППМ. Однако методика определения рационального ППМ для произвольного варианта исходных данных решаемой задачи к настоящему времени отсутствует.

Для определения числа ППМ для текущего варианта исходных данных и первого хорошего в смысле выбранного критерия оптимальности приближения к искомому экстремуму (для начальной инициализации алгоритма) предлагается использовать результат предварительного решения задачи методом динамики формирования рек (МДФР) [7]. Данный метод отличается невысокой вычислительной сложностью и не требует для получения результата настройки значительного (как в МРЧ) числа параметров и задания размерности решаемой задачи.

Принцип работы алгоритма МДФР заключается в имитации процесса формирования русел рек. Набор капель, помещенных в исходную точку, под воздействием гравитации осуществляют движение по рельефу, определяемому картой высот к конечной, самой низкой точке. В ходе этого процесса образуются русла рек со множеством извилин.

Применительно к решаемой задаче создается набор агентов-капель, которые перемещаются между узлами (ячейками) карты высот, исследуя пространство в поиске наилучшего решения. Закрепление промежуточных результатов поиска решения выполняется имитацией механизмов эрозии и осаждения почвы, связанных с изменением значений ячеек карты высот.

Капли, перемещаясь, размывают грунт на своей траектории (забирая часть почвы из ячеек) или осаждают переносимый осадок (таким образом, увеличивая их высоту). Вероятность выбора следующей ячейки карты высот зависит от градиента, который пропорционален разнице между значениями текущей и соседней с ней ячеек. Высота конечной ячейки задается равной нулю и в ходе решения задачи не меняется. На каждом шагу алгоритма МДФР группа капель последовательно пересекает пространство поиска, с последующим выполнением эрозии на посещенных ячейках.

Капли перемещаются поочередно, до тех пор, пока не достигнута конечная ячейка, либо будет возможности для перемещения (тупик) или выполнено максимально допустимое количество перемещений.

На *k*-м шаге алгоритма вероятность перемещения из текущей *i*-й ячейки карты высот в соседнюю *j*-ю определяется по зависимости

$$P_k(i,j)=\frac{B^{G(i,j)}}{(d_j)^{\alpha}\left[\sum\limits_{l\in V_k(i)\cup U_k(i)\cup F_k(i)}\frac{B^{G(i,l)}}{(d_l)^{\alpha}}\right]},$$

где B – основание функции; α – коэффициент настройки сходимости; d_j – декартово расстояние от ячейки j до конечной ячейки; $V_k(i)$ – множество соседних узлов с положительным градиентом (ячейка i имеет большее значение, чем ячейка j), $U_k(i)$ – множество соседних ячеек с отрицательным градиентом (значение ячейки j больше), $F_k(i)$ – множество соседних с i-й ячеек с нулевым градиентом; $G(i,j)$ – градиент высот между i-й и j-й ячейками карты высот

$$G(i,j)=\frac{h_i-h_j}{L(i,j)};$$

h_i – значение i-й ячейки карты высот; $L(i,j)$ – расстояние между i-й и j-й ячейками.

После перемещения всех капель (завершения одной итерации алгоритма) выполняется процесс эрозии на всех пройденных путях путем уменьшения значений ячеек карты высот пропорционально их градиенту со следующей ячейкой

$$\Delta H(i,j)=\frac{E^{-}}{(N-1)D}G(i,j),$$

где D – число капель; N – число ячеек карты высот; E^- – коэффициент эрозии.

Кроме того, если капле не удалось выбрать следующую ячейку для перехода, она откладывает часть перенесенного осадка и испаряется до конца итерации алгоритма. Это уменьшает вероятность перехода в тупики и приводит к ослаблению плохих путей.

Для исключения ситуации, когда содержимое значительного числа ячеек близки к нулю, что делает незначительными величины градиентов и нарушает формирование путей к конечной ячейке, в завершение каждой итерации алгоритма определенное и небольшое количество осадка добавляется ко всем значениям ячеек карты высот

$$\Delta H^{+}(i,j)=\frac{E^{+}}{N-1},$$

где E^+ – коэффициент осадка.

В качестве условия окончания алгоритма могут использоваться:

1. Пути, сформированные всеми каплями, идентичны.
2. Отсутствие улучшения качества решения (например, длины пути) за последние n итераций.
3. Выполнение заданного количества итераций.

Результаты экспериментальной проверки эффективности применения МДФР для решения задачи построения маршрута движения ЛА представлены на рис. 1. На рис. 1, а приведена исходная карта высот, на рис. 1, б – результат решения задачи. Для карты высот размерностью 30×30 использованы следующие основные параметры алгоритма: числа задействованных капель – 500, итераций – 100. Время получения решения составило 36 сек. На рис. 1, б помимо полученного пути движения капель из исходной точки в конечную, на его основе сформирован маршрут движения ЛА с заданной высотой полета.

Алгоритм определения перечня ППМ и их местоположения на основе полученного МДФР пути движения капель из начальной в конечную точки включает следующие шаги.

Path – массив координат ячеек, входящих в результирующий путь капель из исходной в конечную точки;

Track – массив координат ППМ ЛА;

H^n – заданная высота полета ЛА.

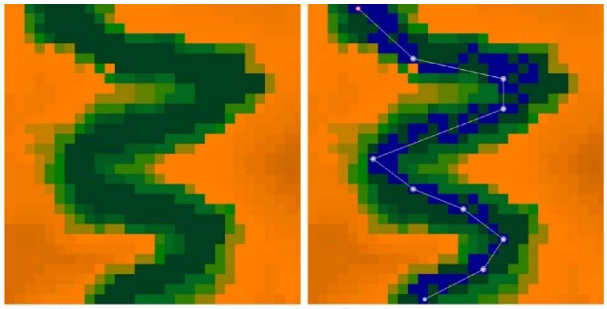
1. $i = 0$; $k = i + 1$; $N = Path.Count$; $Track \leftarrow Path[0]$

2. Если линия, проведенная между i-м элементом *Path* и k-м, пересекает на высоте H^n элементы рельефа, задаваемые картой высот, то перейти к шагу 3, иначе к шагу 4

3. $Track \leftarrow Path[k-1]$; $I = k - 1$; Перейти к шагу 2

4. Если $k = N - 1$ перейти к шагу 5 иначе: $k = k + 1$; Перейти к шагу 2
5. $Track \leftarrow Path[N - 1]$; Конец

Из полученных результатов видно, что применение МДФР позволяет получать рациональный маршрут из исходной точки в конечную в условиях сложного рельефа местности. В следствие особенностей работы МДФР ППМ имеют координаты, совпадающие с центрами соответствующих ячеек карты высот, что не во всех случаях может удовлетворить требования по точности их расположения. Уточнение положения ППМ возможно путем применения МРЧ.



а) исходная карта высот б) результат решения задачи методом ДФР

Рис. 1. Результат решения задачи

Схема комплексного применения МРЧ и МДФР для решения задачи построения маршрута движения летательного аппарата представлена на рис. 2.

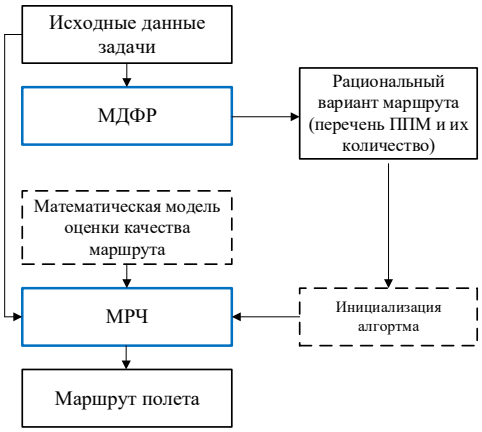


Рис. 2. Схема применения многоагентных методов для решения задачи построения маршрута движения ЛА с учетом рельефа местности

На заданных исходных данных первоначально задача решается МФДР. Полученный маршрут движения ЛА принимается за базовый (опорный). Относительно числа ППМ, входящих в базовый маршрут движения ЛА определяются параметры алгоритма МРЧ по методике, изложенной в [5, 8]. Далее выполняется инициализация МРЧ. При этом базовый маршрут движения ЛА включается в состав промежуточных вариантов решения задачи, задаваемых частицами в МРЧ. Это приводит к тому, что базовый маршрут с высокой степенью вероятности будет являться лучшим для всего роя частиц, что будет способствовать скорейшему движению всего роя в направлении экстремума решаемой задачи. Задача решается методом роя частиц с применением математической модели оценки качества маршрутов [2-5].

Подобное построение вычислительного процесса позволит гарантированно получать рациональный вариант маршрута ЛА, нивелируя влияние начальной инициализации МРЧ без применения островной его версии, что в свою очередь позволит сократить существенно время решения задачи.

Список литературы

1. Моисеев В.С. Динамика полета и управление беспилотными летательными аппаратами: монография. Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2017. 416 с.

2. Есиков О.В., Акиншин О.Н., Хомяков К.А., Агафонов Д.О. Модели алгоритмы имитации движения воздушных целей в тренажерных комплексах. Тула: ВСРОК, 2022. 115 с.

3. Nikolos I.K., Valavanis K.P., Tsourveloudis N.C., Kostaras A.N. Evolutionary Algorithm Based Offline/Online Path Planner for UAV Navigation // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics – part b: cybernetics. 2003. doi: 10.1109/TSMCB.2002.804370

4. Есиков О.В., Данилов А.В., Земляницын М.С. Планирование маршрута движения летательного аппарата с применением многоагентных алгорит-мов стохастического поиска решения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 12. 2022. С. 156-159.

5. Есиков О.В. Решение задачи планирования маршрута движения летательного аппарата с учётом рельефа местности / О.В. Есиков, Р.Н. Акиншин, А.В. Данилов, М.С. Земляницын // Электронные информационные системы. № 1 (36). 2023. С. 17-26.

6. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: уч. пособие. Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 446 с.

7. Rabanal P., Rodriguez I. and Rubio F. Applying River Formation Dynamics to Solve NP-Complete Problems. In: Nature-Inspired Algorithms for Optimisation. Ed. by R. Chiong. Vol. 193. Studies in Computational Intelligence. Springer Berlin Heidelberg. 2009. Pp. 333-368.

8. Есиков О.В., Есиков Д.О., Акиншина Н.Ю. Общие принципы выбора параметров многоагентных алгоритмов стохастического поиска для решения отдельных задач дискретной оптимизации // Приборы и системы. Контроль, управление, диагностика. № 5. 2018. С. 47-56.

Есиков Олег Витальевич, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро автоматики (ЦКБА),

Данилов Александр Владимирович, преподаватель, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения,

Земляницын Максим Самюэльевич, студент, Россия, Тула, Тульский государственный университет

COMPLEX APPLICATION OF MULTI-AGENT ALGORITHMS FOR SOLVING THE PROBLEM OF CONSTRUCTING THE ROUTE OF THE AIRCRAFT TAKING INTO ACCOUNT THE TERRAIN

O.V. Yesikov, A.V. Danilov, M.S. Zemlyanitsyn

To guarantee the quality of the result of solving the problem of constructing the route of the aircraft, taking into account the terrain, a comprehensive use of multi-agent stochastic search algorithms is proposed. To form a basic variant of the route of the aircraft, the application of the method of dynamics of the formation of rivers is justified. It is proposed to obtain a rational route for the movement of the aircraft on the basis of the obtained base using the particle swarm method.

Key words: route planning, multi-agent algorithm.

Yesikov Oleg Vitalievich, doctor of technical sciences, professor, deputy head of the department, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC Central Automation Design Bureau (CDBAE),

Danilov Alexander Vladimirovich, teacher, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics,

Zemlyanitsyn Maxim Samuelevich, student, Russia, Tula, Tula State University

УДК 681.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-78-79

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОВЕДЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ ВИДИМЫХ ДЕФЕКТОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

И.В. Зайчиков

Выполнен анализ параметров контроля рисунка печатных проводников в группевизуально наблюдаемых дефектов печатных плат и возможностей применения планшетных сканеров дляпроведения автоматизированного размерного контроля указанных дефектов.

Ключевые слова: печатные платы, параметры, визуальные дефекты, планшетные сканеры, автоматизированный размерный контроль.

Группа визуально наблюдаемых дефектовпечатных плат (ПП) по ГОСТ Р56251-2014 [1] подлежит визуальному контролю. При этом применяются инструментальное оборудование, позволяющее выполнить просмотр ПП с увеличением в диапазоне от 1,75 до 40 кратности.

Обычно оптическим инструментальным оборудованием для проведения визуального контроля в самом простом случае может быть микроскоп. Но при его применении возникает ограниченная зона просмотра. По этой причине требуется многократноепермещение ПП для контроля всего рисунка. В более дорогих системах для визуального контроля погрешностей формы проводников рисунка ПП применяют проекторы с увеличением в диапазоне от 10 до 20 кратности.

Основными параметрами при внешнем визуальном осмотре является рисунок печатных проводников, который обеспечивает правильную эксплуатацию всего собранного на ПП устройства. Параметры контроля рисунка печатных проводников определяются в ГОСТ Р 53429-2009 [2]. Основными параметрами являются ширина проводника, зазор между проводниками и поясок контактной площадки. Их наименьшие номинальные значения определены в таблице 2 указанного ГОСТа в зависимости от класса точности изготовления ПП.

Анализ параметров указанной таблицы позволяет сделать вывод, что в качестве инструментального оборудования, позволяющее выполнить визуальный контроль ПП для ряда классов и их параметров можно использовать современные устройства – планшетные сканеры. Для реализации визуального контроля физическая разрешающая способность сканера должна соответствовать параметрам, указанным в приведённой таблице.

Параметры физической разрешающей способности сканера

Наименование параметра	Наименьшие номинальные значения размеров для класса точности						
	1	2	3	4	5	6	7
Ширина проводника	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
Расстояние между проводниками	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
Гарантийный поясок контактной площадки	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025	0,020	0,015

На текущий момент на рынке планшетных сканнеров присутствуют два основных класса устройств: офисные и профессиональные. Разрешающая способность планшетного сканера определяется его оптической системой с основным внутренним элементом – прибором с зарядовой связью линейного типа или ПЗС-линейки, а также точностью механической системы позиционирования ПЗС-линейки.

Оптическая система планшетных сканеров использует световой поток, отражаемый от сканируемой поверхности, который попадает на приёмный элемент, выполняющий разделение спектра отражённого излучения на три цветовых компоненты, которые в свою очередь попадают на три параллельные ПЗС-линейки, имеющие одинаковое количество фотоприёмных ячеек. Каждая ПЗС-линейка формирует соответствующий электрический сигнал. Обычно имеется одна фокусирующая линза на всю ширину области сканирования и на всю ширину одной ПЗС-линейки. Такая оптическая системы применяется в однопроходных сканерах и является очень требовательной к качеству оптических элементов. Особенно требовательными являются края рабочей области сканирования из-за увеличенных искажений по отношению к цветным сканируемым поверхностям. Качество фокусировки и разрешающая способность оптической системы проверяются с помощью тестовых поверхностей-мишеней. В трёхпроходных сканерах используются источники света с разными цветами излучения, которые включаются в соответствующем проходе сканирования. Другим вариантом является смена светофильтров на одном и том же источники света или ПЗС-линейке. ПЗС-линейка выполняет фотоэлектрическое преобразование уровня входной освещенности в уровень выходного аналогового напряжения. Далее выполняется коррекция и обработка аналогового сигнала. После чего производится аналого-цифровое преобразование. С блока АЦП информация передаётся в персональный компьютер в цифровом виде с помощью контроллера сканера через интерфейс связи с компьютером под управлением драйвера сканера. Драйвер обычно называется TWAIN-модулем и он передаёт цифровое изображение прикладным программам пользователя..

В планшетных сканерах с более высоким качеством могут использоваться сменные линзы. Дополнительные линзы проецируют только часть рабочей ширины области сканирования на всю ширину ПЗС-линейки, что соответственно увеличивает оптическое разрешение

Источник света в планшетном сканере должен также иметь стабильные характеристики в течении всего срока эксплуатации. Первоначально использовались флуоресцентные лампы, похожие на лампы дневного света. Они имели недостаток в виде низкой стабильности характеристик освещения и ограниченный срок службы. В современных планшетных сканерах источником света является лампа с холодным катодом. Она имеет более стабильные характеристики освещения и существенно больший срок службы. Для реализации стабильных характеристик освещения профессиональные цветные сканеры имеют внутренние функции самокалибровки по интенсивности светового потока, а также системы стабилизации интенсивности светового потока в зависимости от температуры. По этой причине чаще всего в сканерах лампа только одна.

Таким образом современная оптическая система сканера является сложным и прецизионным узлом, без которого невозможно получать качественные и точные изображения сканируемых поверхностей.

Механическая система планшетных сканеров выпускается очень небольшим составом производителей, которые продают их другим компаниям, выпускающим сканеры под своей торговой маркой. Конструкция механической системы у этого состава производителей уже отработана, производство отлажено и технологически выверено. Поэтому соответствующая стоимость является приемлемой. Основные производители сосредоточены на Тайване и поставляют свои комплектующие таким широко известным конечным компаниям-продавцам как AGFA, Linotype-Hell и UMAX и т.д.

В соответствии с указанными системами планшетный сканер характеризуется оптическим и механическим разрешениями.

Оптическое разрешение определяется количеством фотоприёмных ячеек в ПЗС-линейке, соотнесённое к ширине рабочей области сканирования.

Механическое разрешение определяется количеством раз «считывания» всех фотоприёмных ячеек в ПЗС-линейке, соотнесённое к длине пути, пройденного за это время сканирующей кареткой. Обычно механическое разрешение в 2-4 раза больше оптического. Так как ПЗС-линейка не может обеспечить разрешение выше оптического при сканировании, а размер отсканированной точки должен соответствовать квадрату, то недостающие по ширине точки добавляются с помощью интерполяционных расчётов. Поэтому в измерительных целях следует ориентироваться на меньшее значение по разрешению, которое обеспечивает оптическая система.

Интерполяционное разрешение определяется программными средствами и в измерительных целях не представляет особого значения.

Количество бит на цвет или глубина цвета в планшетных сканерах может быть разной для получения цветного или полутонового серого изображения. Стандартный видеоадаптер в персональном компьютере использует 24-бита на точку для полноцветного изображения или по 8-бит на красную, зелёную, синюю компоненту одной RGB-точки. В этом случае общее количество воспроизводимых цветов составляет более 16 миллионов. Планшетные сканеры поддерживают данный стандарт как самый массовый. Однако на текущий момент распространяются и более точные по цветопередаче устройства. Например, в пределах 32-битного слова персонального компьютера можно хранить три цветные компоненты для RGB-точки, каждая из которых представлена 10-ю битами. Соответствующее цветное изображение может использовать более миллиарда цветовых оттенков. Соответствующие устройства: мониторы и видеоадаптеры - являются очень дорогими и могут оправдать свою цену только в узком наборе решаемых задач, например в медицине.

В современных планшетных сканерах тоже есть модели с большой глубиной цвета, например, 30-битные, 36-битные и даже 48-битные. К обычному персональному компьютеру данные модели подключить можно, но просмотреть отсканированное такое цветное изображение не получится. Данные модели сканеров могут быть использованы для гамма-коррекции шкалы аналогово-цифрового преобразования, например, для исключения потери необходимой информации, содержащейся в младших разрядах кода цветовых компонент RGB. В этих случаях внутреннее цветное изображение, находящееся в сканере будет более точным. Но обработанное и переданное цветное изображение в обычный персональный компьютер останется доступным только в стандартном 24-битном представлении.

Диапазон оптических плотностей в планшетных сканерах показывает насколько хорошо сканер различает соседние оттенки в шкале яркостей цветовых RGB-компонент. Оптическая плотность математически определяется как десятичный логарифм отношения света, падающего на сканируемую поверхность, к свету, отраженному от сканируемой поверхности для непрозрачных объектов или к свету, пропущенному через просвечиваемые слайды и негативы. Минимально допустимое значение оптической плотности 0.0 D соответствует идеально белой отражающей поверхности или идеально прозрачной поверхности. Максимально допустимое значение оптической плотности 4.0D. Значение 4.0D соответствует идеально черной отражающей поверхности или идеально черной непрозрачной поверхности.

Большинство обычных цветных фотографий имеют диапазон оптических плотностей до 2.5D. Негативы и рентгеновские снимки имеют больший диапазон оптических плотностей до 3.0 - 3.6D. Обычные планшетные сканеры соответствуют обычным цветным фотографиям и имеют диапазон оптических плотностей 2.0-2.7D. Хорошие 36-битные планшетные сканеры соответствуют негативам и рентгеновским снимкам и имеют диапазон оптических плотностей 3.0-3.3D. Новейшие модели планшетных сканеров имеют увеличенный диапазон оптических плотностей до 3.6D.

Диапазон оптических плотностей планшетных сканеров определяется типом, точностью и разрядностью аналогово-цифрового преобразователя, качеством оптической системы и ПЗС-линейки, а также алгоритмами функционирования контроллера сканера. Яркость лампы при этом имеет вторичное значение. При большой освещённости ПЗС-линейка избыточно засвечивается и рне передаёт яркие полутона. Аналогово-цифровой преобразователя при этом выкладывается на верхний предел шкалы и не воспринимает превышающие напряжения. При малой освещённости ПЗС-линейка достигает своего порога чувствительности и начинает выдавать собственные шумы. Аналогово-цифровой преобразователя в этой ситуации выкладывается на нижний предел шкалы и не воспринимает напряжения, меньшие соответствующего веса младшего разряда.

Рассмотренные конструкции и характеристики планшетных сканеров позволяют сделать вывод о возможности их применения как инструментальных средств для проведения визуального контроля печатных плат. Офисные планшетные сканеры имеют оптическую разрешающую способность 600-1200 точек на дюйм. Профессиональные планшетные сканеры имеют оптическую разрешающую способность 2400-3000 точек на дюйм. Для оценки возможностей проведения измерительного контроля визуально наблюдаемых дефектов необходимо пересчитать данные параметры в размеры точки получаемого изображения. Точка отсканированного изображения на офисном планшетном сканере при оптическом разрешении 600 точек на дюйм будет иметь линейный размер стороны эквивалентного квадрата 0.042 мм, при 1200 точках на дюйм соответственно 0.021 мм. Эти параметры нужно сопоставлять с размером гарантированного пояса контактной площадки как наименьшего размера класса точности изготовления ПП. Значение 0.042 мм соответствует 4 классу точности. Значение 0.021 мм соответствует 5 классу точности и очень близко к 6 классу точности. Для профессиональных сканеров эти значения существенно лучше. Точка отсканированного изображения на профессиональном планшетном сканере при оптическом разрешении 2400 точек на дюйм будет иметь линейный размер стороны эквивалентного квадрата 0.011 мм, при 3000 точках на дюйм соответственно 0.0085 мм. Оба приведенных значение лучше точности 7 класса.

Таким образом, хороший офисный планшетный сканер может быть применён как инструментальное оборудование для проведения визуального контроля качества ПП с возможностью измерения геометрических параметров ряда возникающих в производстве дефектов ПП.

Список литературы

1.ГОСТ Р 56251-2014. Платы печатные. Классификация. М., 2014.

2.ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М., 2009.

3.ГОСТ Р 56251-2014. Платы печатные. Классификация [Электронный ресурс] URL: https://docs.cntd.ru/document/1200114718 (дата обращения: 10.05.2023).

Зайчиков Игорь Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, zigorwm@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF AUTOMATED DIMENSIONAL CONTROL OF VISIBLE DEFECTS OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

I.W. Zaichikov

The analysis of the parameters of the control of the pattern of printed conductors in the group of visually observed defects of printed circuit boards and the possibilities of using flatbed scanners for automated dimensional control of these defects is performed.

Key words: printed circuit boards, parameters, visual defects, flatbed scanners, automated dimensional control.

Zaychikov Igor Wyacheslavovich, candidate of technical science, docent, zigorwm@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.396
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-81-82

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛОВОГО ШУМА В МОНОИМПУЛЬСНОМ ПЕЛЕНГАТОРЕ

С.А. Курбатский, Д.А. Хомяков, И.А. Ростовцев

Приведены результаты влияния распределения светящихся точек объекта на статистические характеристики углового шума при импульсном зондирующем сигнале на примере моноимпульсного суммарно-разностного пеленгатора. Показано, что при изменении расстояния между плоскостями крайних точек распределения углового шума являются распределениями Стьюдента. Установлено, что по мере уменьшения длительности зондируемых импульсов плотность распределения углового шума сужается и, как следствие, увеличивается точность измерения угловых координат.

Ключевые слова: пеленгатор, угловой шум, светящаяся точка, сигнал ошибки.

В случае большой протяженности пеленгуемого объекта не только по углу, но и по дальности, принимаемые сигналы являются суперпозицией импульсных откликов от светящихся точек объекта, имеющих различное время задержки. Поскольку в современных пеленгаторах оценка угловой координаты объекта формируется по таковому совокупному сигналу, то, естественно, разнесенность по дальности светящихся точек сказывается на статистике угловых шумов. Представляет определенный интерес анализ влияния распределения светящихся точек объекта на статистические характеристики углового шума при импульсном зондирующем сигнале на примере моноимпульсного суммарно-разностного пеленгатора.

Пусть пеленгуемый объект представляет совокупность точечных отражателей. Тогда принимаемые после излучения очередного зондирующего импульса сигналы в суммарном и разностном каналах пеленгатора могут быть записаны в виде

$$e_c(t) = \sum_n e_n \pi(t - t_n); \quad e_p(t) = \sum_n \theta_n e_n \pi(t - t_n), \tag{1}$$

где $e_n = E_n e^{i\varphi_n}$; E_n, φ_n, t_n – амплитуда, фаза и время задержки сигнала, отраженного от n-й светящейся точки объекта, обобщенная угловая координата которой $\theta_n = \prod(\theta_{n0}), \prod(\theta)$ – пеленгационная характеристика; θ_{n0} – истинная угловая координата; $\pi(t)$ – огибающая импульса длительностью τ_n.

Как показано в [1, 2], сигнал ошибки в моноимпульсном суммарно-разностном пеленгаторе

$$\eta = \left\langle \mathrm{Re}\left(e_p e_c^*\right)\right\rangle / \left\langle e_p e_c^*\right\rangle, \tag{2}$$

где угловые скобки – усреднение (интегрирование) во времени сигнальных процессов в узкополосных фильтрах квадратичных фазового и амплитудного детекторов.

Подставляя (1) в (2) и учитывая, что $\int \pi(t)\pi(t-\tau)dt = s(\tau)$, где $s(\tau)$ – автокорреляционная функция огибающей импульса, $s(0) \equiv 1$, получаем выражение для сигнала ошибки

$$\eta = \left(X'\Sigma PX + Y'\Sigma PY\right) / \left(X'PX + Y'PY\right),$$

где $X = \left\|\mathrm{Re}(e_n)\right\|_1^N$, $Y = \left\|lm(e_n)\right\|_1^N$ – векторы; $\Sigma = diag(\theta_1, ..., \theta_N)$ – диагональная матрица, элементы главной диагонали которой равны обобщенным угловым координатам светящихся точек объекта; $P = \left\|s_{mn}\right\|$ – симметричная матрица размера $N \times N$, элементами которой являются $s_{mn} = s(t_m - t_n)$; t_n – время задержки отклика от n-й светящейся точки; N – количество светящихся точек объекта.

Найдем плотность и первые моменты распределения случайной величины η. Полагая, что e_n, $n = 1$, N – узкополосный комплексный случайный процесс, а корреляционная матрица независимых векторов X и Y равна K после вычислений получаем выражение для характеристической функции в виде

$$\begin{aligned}\chi(p,q) &= \left[(2\pi)^{M/2} p^M \prod_{m=1}^M \lambda_m\right]^{-1} \times \\ \times \int \exp\left\{\sum_{m=1}^M \left[-u_m^2 / \left(2p^2\lambda_m^2\right) + iqu_m^2 / \left(p^2\lambda_m\right) + iU'\left(T^{-1}\Sigma T_m\right)u_m / \left(p\lambda_m\right)\right] - \right. \\ \left. -0{,}5\sum_{m=M+1}^N \left(U'T^{-1}\Sigma T_m\right)^2\right\} dU,\end{aligned} \tag{3}$$

где M – количество ненулевых чисел λ_n; $\lambda_n, n = \overline{1, N}$ - суть корни уравнения $\det\left(\lambda K^{-1} - P\right) = 0$; T_m – m-й столбец матрицы T.

Очевидно, что дальнейшее интегрирование (3) в общем виде невозможно. Поэтому рассмотрим два частных случая.

Пусть пеленгуемый объект может быть представлен 2-точечной моделью [3, 4]. В этом случае $M = 2$, $\lambda_{1,2} = \sigma_c^2\left(1 \pm \sqrt{\left[1 - b^2\left(1 - s^2\right)\right]}\right)/2$, где $\sigma_c^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$; $b = 2\gamma / \left(1 + \gamma^2\right)$; $\gamma = \sigma_1 / \sigma_2$; $s = s(t_1 - t_2)$;

$\sigma_1^2, t, \sigma_2^2, t_2$ – дисперсии и времена задержки сигналов от первой и второй точек. Произведя интегрирование в (3) и найдя обратное преобразование Фурье от характеристической функции, получим совместную плотность распределения случайных величин z_c, z_p. Тогда, после замены переменных, получим плотность распределения случайной величины η

$$\omega(\eta) = \frac{b^2\left[1+\left(1-s^2\right)\alpha\eta\right]}{2\left\{\left[a^2+b^2s^2\right]\eta^2+2\alpha\eta+1\right\}^{3/2}}; \quad |\eta| \le \sqrt{\left(1-s^2\right)^{-1}}, \tag{4}$$

где $a = \left(1-\gamma^2\right)/\left(1+\gamma^2\right)$.

Для γ = 1

$$\omega(\eta) = 0{,}5\left(1+s^2\eta^2\right)^{-3/2}; \quad |\eta| \le \sqrt{\left(1-s^2\right)^{-1}}.$$

Математическое ожидание и дисперсия η в этом случае равны $E\eta = 0$ и $D\eta = \left[\ln\left(\left(1+s\right)/\left(1-s\right)\right)/\left(2s\right)-1\right]/s^2$.

Таким образом, закон распределения сигнала ошибки при изменении s меняется в очень широких пределах: от закона Стьюдента с двумя степенями свободы при нахождении точек объекта на одной дальности ($s=1$, $D\eta \to \infty$) до равномерного закона при полном разрешении точек по дальности ($s=0,\ D\eta = 1/3$).

Рассмотрим теперь второй случай. Пусть пеленгуемый объект представлен моделью, состоящей из двух разнесенных в пространстве по дальности на расстояние *L* плоскостей светящихся точек. Допустим, что количество светящихся точек в плоскостях одинаково, а распределение интенсивности сигнала светящихся точек каждой плоскости равномерное.

Тогда $M = 2$, $\lambda_{1,2} = 0{,}25N\sigma^2\left(1 \pm s\right)$, $s = s\left(2L/c\right)$, *c* – скорость распространения волн.

Учитывая это, найдем дисперсию и математическое ожидание случайной величины η методом характеристических функций. Для этого воспользуемся равенством

$$E\eta^{\alpha} = \int \left(z_B/z_H\right)^{\alpha} \omega\left(z_B, z_H\right) dz_B dz_H = \int \chi^2\left(p,q\right) F^{-1}\left[\left(z_B/z_H\right)^{\alpha}\right] dpdq; \ \alpha = 1,2,$$

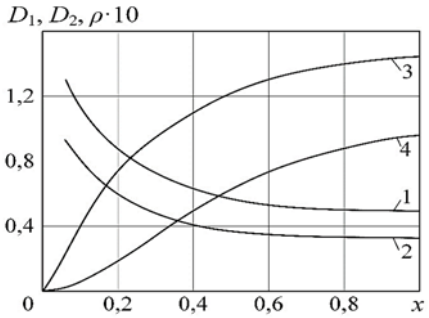
где $\omega\left(z_B, z_H\right)$ – плотность распределения случайных величин z_B; z_H, $F^{-1}[\cdot]$ – оператор обратного преобразования Фурье; α = 1 при нахождении математического ожидания и α = 2 при нахождении дисперсии.

Тогда, интегрируя получаем выражение для математического ожидания и дисперсии

$$E\eta = \left(\theta_1+\theta_2\right)/2; \quad D\eta = \beta^2 D_1 + \Delta^2 D_2,$$

где $D_1 = -0{,}5\left(1+\frac{1}{s}\ln\frac{1-s}{1+s}\right)$, $D_2 = -0{,}5\left(2+\frac{1}{s}\ln\frac{1-s}{1+s}\right)/s^2$.

На рисунке приведены зависимости величин D_1 (кривая 1) и D_2 (кривая 2) от относительной задержки между сигналами от плоскостей $x = 2L/\left(c\tau_{и}\right)$ при прямоугольной огибающей импульса, когда $s = 1-x$.



Зависимость величин D_1 и D_2 от относительной задержки между сигналами

При изменении *x* от 0 до 0,1 величины D_1 и D_2 быстро убывают, а затем при $x > 0{,}1$ их уменьшение замедляется.

Математическое ожидание при этом остается неизменным и равным среднему арифметическому от угловых координат энергетических центров плоскостей. При полностью идентичных по своим угломерным и энергетическим характеристикам плоскостях, когда $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ и $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, несложно определить плотность случайной величины $\chi = \beta^{-1}\left(\eta - \theta\right)$:

$$\omega(\chi)=\left[2+a^2+\left(a^2\left(4-a^2\right)\right)\chi^2\right]/\left[4\left(1+a^2\chi^2\right)^2\left(1+\chi^2\right)^{3/2}\right], \quad (5)$$

где $a=1-s^2$.

При $s=1$ (плоскости на одной дальности, $a=0$), как и следовало ожидать, $\omega(\chi)=0,5\left(1+\chi^2\right)^{-3/2}$, при s = 0 (плоскости полностью разрешены, $a=1$) $\omega(\chi)=0,75\left(1+\chi^2\right)^{-5/2}$.

Таким образом, при изменении расстояния между плоскостями крайних точек распределения углового шума являются распределениями Стьюдента с числом степеней свободы m = 2, m = 4. Определим теперь количественно, как изменяется распределение углового шума при изменении взаимного расположения светящихся точек объекта.

Для этого в качестве меры расстояния между двумя распределениями, интегральные функции которых равны $F(\eta)$ и $F_0(\eta)$, воспользуемся расстоянием Колмогорова $\rho=\sup\left|F(\eta)-F_0(\eta)\right|$. В качестве $F_0(\eta)$ выберем интегральную функцию распределения Стьюдента с двумя степенями свободы $F_0(\eta)=0,5\left(1+\eta/\sqrt{\left(1+\eta^2\right)}\right)$, поскольку именно это распределение характеризует угловой шум протяженных объектов, светящиеся точки которых находятся на одной дальности [4].

На рисунке приведены зависимости ρ от относительной задержки между сигналами $x=\left|t_1-t_2\right|/\tau_н$ для двухточечной модели с плотностью распределения (4) (кривая 3) и 2-плоскостной модели с плотностью распределения (5) (кривая 4) при прямоугольной огибающей зондирующего сигнала. Из сравнения кривых видно, что распределение углового шума для 2-точечной модели существенно зависит от x, особенно при малых значениях параметра. При больших значениях x увеличение ρ замедляется, т.е. распределение углового шума становится близким к равномерному.

Анализ полученных результатов свидетельствует о значительном влиянии расположения светящихся точек по дальности на статистические характеристики углового шума, особенно при малом количестве светящихся точек N. При увеличении N эти различия становятся менее заметными, что является следствием нормализации сигналов в суммарном и разностном каналах моноимпульсного пеленгатора из-за улучшения условий выполнимости центральной предельной теоремы.

Вариации вероятностного распределения углового шума при изменении геометрии пеленгуемого объекта особенно заметны, когда длительность зондирующих сигналов становится соизмеримой со временем распространения электромагнитных волн вдоль объекта. При этом по мере уменьшения длительности зондируемых импульсов плотность распределения углового шума сужается и, как следствие, увеличивается точность измерения угловых координат.

Список литературы

1. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.

2. Монаков А.А., Островитянов Р.В., Храмченко Г.Н. Измерение угловых координат моноимпульсным методом в режиме обзора // Известия вузов. Радиоэлектроника. 1989. № 7. С. 72-73.

3. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник под редакцией профессора Я.Д. Ширмана. М.: ЗАО Маквис, 1998. 825 с.

4. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М.: Радио и связь, 1986. 181 с.

Курбатский Сергей Алексеевич, заместитель генерального директора, начальник НТК, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро автоматики (ЦКБА),

Хомяков Денис Александрович, начальник лаборатории, sales@npo-pkrv.ru, Россия, Тула, ОАО «НПО ПКРВ»,

Ростовцев Иван Александрович, преподаватель, paaii@mail.ru, Россия, Пенза, Пензенский АИИ

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF ANGULAR NOISE IN A MONOPULSE DIRECTION FINDER

S.A. Kurbatsky, D.A. Khomyakov, I.A. Rostovtsev

The results of the influence of the distribution of luminous points of an object on the statistical characteristics of angular noise with a pulsed probing signal are presented on the example of a monopulse sum-difference direction finder. It is shown that when the distance between the planes of the extreme points changes, the angular noise distributions are Student distributions. It is found that as the duration of the probed pulses decreases, the angular noise distribution density narrows and, as a consequence, the accuracy of measuring angular coordinates increases.

Key words: direction finder, angular noise, luminous dot, error signal.

Kurbatsky Sergey Alekseevich, deputy general director, head of the STC, cdbae@cdbae.ru, Russia, Tula, JSC Central Automation Design Bureau (CDBAE),

Khomyakov Denis A. Khomyakov, laboratory manager, sales@npo-pkrv.ru, Russia, Tula, JSC «NPO PKRV»,

Rostovtsev Ivan Aleksandrovich, teacher, paaii@mail.ru, Russia, Penza, Penza AII

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-84-85

СПОСОБ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ БИНС ВЫСОКОМАНЁВРЕННОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ПАРАМЕТРАМ ОРИЕНТАЦИИ НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

О.С. Балабаев, А.В. Прохорцов

Рассмотрен способ определения параметров ориентации высокоманёвренного летательного аппарата (ВЛА) при помощи системы наземных радиомаяков с целью начальной выставки бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Для работы метода необходимо выполнять азимутально-угломестное радиопеленгование антенной ВЛА этих маяков при помощи метода конического сканирование, а также знать расположение этих маяков на местности.

Ключевые слова: начальная выставка, параметры ориентации, высокоманёвренный летательный аппарат, фазовые измерения, бесплатформенная инерциальная навигационная система, метод конического сканирования.

Бесплатформенные инерциальные системы навигации (БИНС) нашли широкое применение в летательных аппаратах, наземных, морских, высокоманёвренных аппаратах. Это связано с автономностью, компактностью, простотой конструкции БИНС и способностью работы в условиях радиоэлектронной борьбы противника. Алгоритмы работы БИНС описываются системой дифференциальных уравнений, и для их численного решения необходимо задать начальные условия, которые и определяются в процессе начальной выставки: 3 *проекции начальной линейной скорости*, 3 *координаты*, а также *ориентацию* в пространстве (углы Эйлера-Крылова, направляющие косинусы, кватернионы) ПО, данный процесс называется *начальной выставкой БИНС*. Чем точнее начальная выставка БИНС, тем медленнее будет накапливаться её погрешность [1-13].

Предлагается способ начальной выставки БИНС по параметрам ориентации, основная сущность которого заключается в следующем:

1. Заблаговременно на местности устанавливаются наземныерадиомаяки (точки $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$, $M_3(x_3, y_3, z_3)$ на рис. 1), разнесённые между собой на некоторое расстояние. Эти маяки служат для возможности пеленгования антенны, установленной на ВЛА (точка $M_0(x_0, y_0, z_0)$).

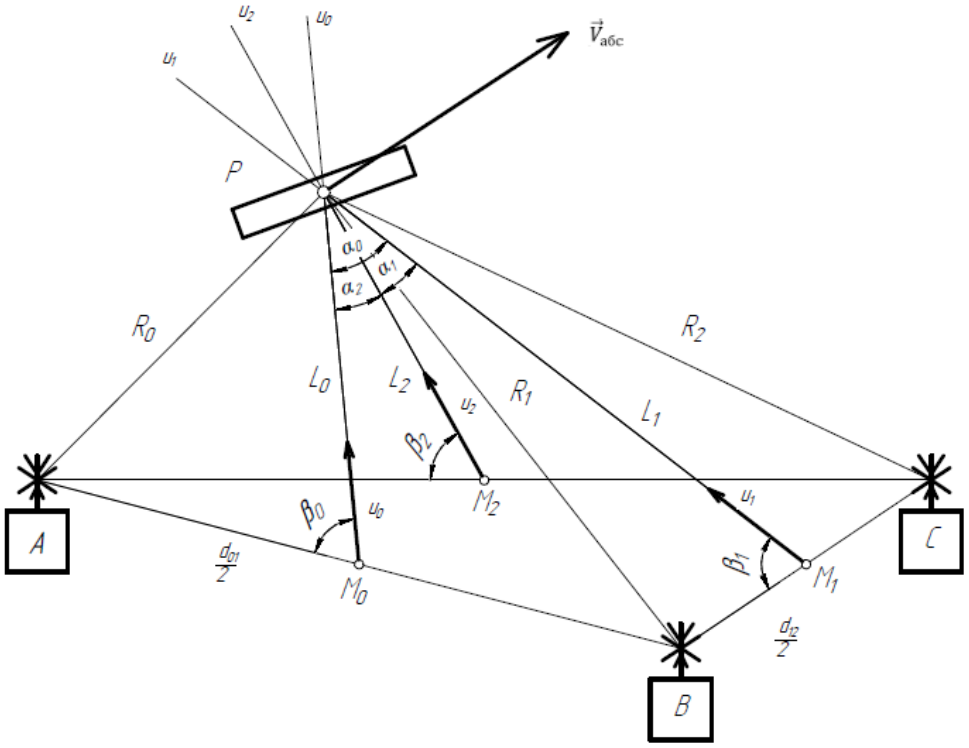


Рис. 1. К пояснению метода определения координат приёмника ВЛА при помощи трёх излучателей на основе фазовых интерферометрических наблюдений

2. Определяются три единичных вектора [14-16] направлений $\vec{r}_{gi}$ на радиомаяки M_1, M_2, M_3 относительно антенны, установленной на ВЛА, в географической системе координат. Определяется матрица R_g, представляющая собой матрицу, составленную из векторов-направлений на радиомаяки в географической системе координат;

3. Определяются 3 пары углов пеленга – углы азимута $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ и места $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ на ВЛА относительно каждого радиомаяка при помощи метода конического сканирования;

4. При помощи углов пеленга составляются единичные векторы-направления на i-ые радиомаяки в связанной СК, а затем из них составляется квадратная матрица $R_{\text{св}}$, определяющая положение ВЛА относительно системы радиомаяков в связанной системе координат;

5. Так как матрица R_{g} может быть найдена при помощи матрицы направляющих косинусов C, которая представляет абсолютную ориентацию ВЛА в пространстве, и матрицы, определяющей положение ВЛА относительно системы радиомаяков в связанной системе координат $R_{\text{св}}$, из данного соотношения выражается матрица направляющих косинусов, уже из которой вычисляются углы Эйлера-Крылова.

Рассмотрим более подробно математическую модель данного метода. Определение трёх единичных векторов направлений на радиомаяки M_1, M_2, M_3 относительно антенны, установленной на ВЛА, в географической системе координат выглядит следующим образом (по формуле, определяющий единичный вектор):

$$\vec{r}_{\text{g}i} = \frac{\vec{r}_0 - \vec{r}_i}{|\vec{r}_0 - \vec{r}_i|}, \tag{1}$$

где $\vec{r}_{\text{g}i}$ – единичный вектор-направление, соединяющий антенну ВЛА и фазовый центр (равносигнальное направление) радиомаяка, $\vec{r}_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$ – радиус-вектор, отражающий пространственное положение ВЛА в географической системе координат, $\vec{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ – i-радиус-вектор, отражающий положение радиомаяков.

Запишем выражение (1)для каждого направления на радиомаяки в более удобном для дальнейших преобразований виде:

$$\vec{r}_{\text{g}i} = \begin{bmatrix} dx_{0i} l_i \\ dy_{0i} l_i \\ dz_{0i} l_i \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где $dx_{0i} = x_0 - x_i$, $dy_{0i} = y_0 - y_i$, $dz_{0i} = z_0 - z_i$–координатывекторов-направлений на i-ый радиомаяк в географической системе координат, $l_i = 1/\sqrt{dx_{0i}^2 + dy_{0i}^2 + dz_{0i}^2}$–нормировочный коэффициент, переводящий составляющую вектора к единичному.

На основании знания координат ВЛА $M_0(x_0, y_0, z_0)$ (т. е. координат вектора $\vec{r}_0$), и векторов-направлений $\vec{r}_i$ на радиомаяки рассчитываются единичные векторы $\vec{r}_{\text{g}i}$ и составляется матрица R_{g}, представляющая собой матрицу, составленную из векторов-направлений на радиомаяки в географической системе координат:

$$R_{\text{g}} = \begin{bmatrix} \vec{r}_{\text{g}1} & \vec{r}_{\text{g}2} & \vec{r}_{\text{g}3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx_{01} l_1 & dx_{02} l_2 & dx_{03} l_3 \\ dy_{01} l_1 & dy_{02} l_2 & dy_{03} l_3 \\ dz_{01} l_1 & dz_{02} l_2 & dz_{03} l_3 \end{bmatrix}, \tag{3}$$

Далее при помощи метода конического сканирования определяются углы пеленга относительно каждого радиомаяка и в связанной СК единичные векторы-направления на i-ые радиомаяки определяются следующим образом:

$$\vec{r}_{\text{св}i} = \begin{bmatrix} \sin\alpha_i \cos\varepsilon_i \\ \sin\varepsilon_i \\ \cos\alpha_i \cos\varepsilon_i \end{bmatrix}, \tag{4}$$

По аналогии (3)определим квадратную матрицу, определяющую положение ВЛА относительно системы радиомаяков в связанной системе координат:

$$R_{\text{св}} = [\vec{r}_{\text{св}1} \quad \vec{r}_{\text{св}2} \quad \vec{r}_{\text{св}3}] = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_1 \sin\alpha_1 & \cos\varepsilon_2 \sin\alpha_2 & \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_3 \\ \sin\varepsilon_1 & \sin\varepsilon_2 & \sin\varepsilon_3 \\ \cos\alpha_1 \cos\varepsilon_1 & \cos\alpha_2 \cos\varepsilon_2 & \cos\alpha_3 \cos\varepsilon_3 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

Тогда можно определить матрицу векторов-направлений в географической системе координат при помощи матрицы направляющих косинусов C, которая представляет абсолютную ориентацию ВЛА в пространстве, и матрицы, определяющей положение ВЛА относительно системы радиомаяков в связанной системе координат $R_{\text{св}}$.

$$R_{\text{g}} = C \cdot R_{\text{св}}, \tag{6}$$

Из выражения (6) находим искомую матрицу:

$$C = R_{\text{g}} \cdot R_{\text{св}}^{-1}, \tag{7}$$

Матрица $R_{\text{св}}^{-1}$ (обратная матрице $R_{\text{св}}$) определяется стандартным образом:

$$R_{\text{св}}^{-1} = \frac{1}{|R_{\text{св}}|} R_{\text{доп.св}}^T, \tag{8}$$

где $R_{\text{допсв}}$ – матрица алгебраических дополненийдля соответствующих элементов матрицы $R_{\text{св}}$.

Определительматрицы $R_{\text{св}}$ определяется следующим образом (из (5)):

$$\begin{aligned} |R_{\text{св}}| = {} & \cos\alpha_1 \cos\varepsilon_1 \cos\varepsilon_2 \sin\alpha_2 \sin\varepsilon_3 - \cos\alpha_2 \cos\varepsilon_1 \cos\varepsilon_2 \sin\alpha_1 \sin\varepsilon_3 - \\ & - \cos\alpha_1 \cos\varepsilon_1 \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_3 \sin\varepsilon_2 + \cos\alpha_3 \cos\varepsilon_1 \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_1 \sin\varepsilon_2 + \quad , \\ & + \cos\alpha_2 \cos\varepsilon_2 \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_3 \sin\varepsilon_1 - \cos\alpha_3 \cos\varepsilon_2 \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_2 \sin\varepsilon_1 \end{aligned}$$

Таким образом, матрица обратной $R_{\text{св}}$, согласно (8), будет определяться следующим образом:

$$R_{\text{св}}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{f_{00}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{01}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{02}}{|R_{\text{св}}|} \\ \frac{f_{10}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{11}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{12}}{|R_{\text{св}}|} \\ \frac{f_{20}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{21}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{22}}{|R_{\text{св}}|} \end{bmatrix}, \tag{9}$$

В выражении (9) коэффициенты f использованы для более короткой записи выражения, они определены следующим образом:

$$
\begin{gathered}
f_{00} = \cos\alpha_2 \cos\varepsilon_2 \sin\varepsilon_3 - \cos\alpha_3 \cos\varepsilon_3 \sin\varepsilon_2 \\
f_{01} = \cos\alpha_2 \cos\varepsilon_2 \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_3 - \cos\alpha_3 \cos\varepsilon_2 \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_2 \\
f_{02} = \cos\varepsilon_2 \sin\alpha_2 \sin\varepsilon_3 - \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_3 \sin\varepsilon_2 \\
f_{10} = \cos\alpha_1 \cos\varepsilon_1 \sin\varepsilon_3 - \cos\alpha_3 \cos\varepsilon_3 \sin\varepsilon_1 \\
f_{11} = \cos\alpha_1 \cos\varepsilon_1 \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_3 - \cos\alpha_3 \cos\varepsilon_1 \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_1, \\
f_{12} = \cos\varepsilon_1 \sin\alpha_1 \sin\varepsilon_3 - \cos\varepsilon_3 \sin\alpha_3 \sin\varepsilon_1 \\
f_{20} = \cos\alpha_1 \cos\varepsilon_1 \sin\varepsilon_2 - \cos\alpha_2 \cos\varepsilon_2 \sin\varepsilon_1 \\
f_{21} = \cos\alpha_1 \cos\varepsilon_1 \cos\varepsilon_2 \sin\alpha_2 - \cos\alpha_2 \cos\varepsilon_1 \cos\varepsilon_2 \sin\alpha_1 \\
f_{22} = \cos\varepsilon_1 \sin\alpha_1 \sin\varepsilon_2 - \cos\varepsilon_2 \sin\alpha_2 \sin\varepsilon_1
\end{gathered}
\tag{10}
$$

Подставляя (9) в (7) получим матрицу направляющих косинусов, из которой в дальнейшем будем определять параметры ориентации ВЛА:

$$
C = \begin{bmatrix} dx_{01}l_1 & dx_{02}l_2 & dx_{03}l_3 \\ dy_{01}l_1 & dy_{02}l_2 & dy_{03}l_3 \\ dz_{01}l_1 & dz_{02}l_2 & dz_{03}l_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{f_{00}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{01}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{02}}{|R_{\text{св}}|} \\ \frac{f_{10}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{11}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{12}}{|R_{\text{св}}|} \\ \frac{f_{20}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{21}}{|R_{\text{св}}|} & \frac{f_{22}}{|R_{\text{св}}|} \end{bmatrix} = \frac{1}{|R_{\text{св}}|} \begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & c_{02} \\ c_{10} & c_{11} & c_{12} \\ c_{20} & c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \tag{11}
$$

где

$$
\begin{gathered}
c_{00} = dx_{02}f_{10}l_2 - dx_{01}f_{00}l_1 - dx_{03}f_{20}l_3,\ \ c_{01} = dx_{01}f_{01}l_1 - dx_{02}f_{11}l_2 + dx_{03}f_{21}l_3, \\
c_{02} = dx_{01}f_{02}l_1 - dx_{02}f_{12}l_2 + dx_{03}f_{22}l_3,\ \ c_{10} = dy_{02}f_{10}l_2 - dy_{01}f_{00}l_1 - dy_{03}f_{20}l_3, \\
c_{11} = dy_{01}f_{01}l_1 - dy_{02}f_{11}l_2 + dy_{03}f_{21}l_3,\ \ c_{12} = dy_{01}f_{02}l_1 - dy_{02}f_{12}l_2 + dy_{03}f_{22}l_3, \\
c_{20} = dz_{02}f_{10}l_2 - dz_{01}f_{00}l_1 - dz_{03}f_{20}l_3,\ \ c_{21} = dz_{01}f_{01}l_1 - dz_{02}f_{11}l_2 + dz_{03}f_{21}l_3, \\
c_{22} = dz_{01}f_{02}l_1 - dz_{02}f_{12}l_2 + dz_{03}f_{22}l_3.
\end{gathered}
$$

Тогда искомые углы Эйлера-Крылова можно определить из найденной матрицы направляющих косинусов (11) для определённой ранее последовательности поворотов следующим образом:

$$
\begin{bmatrix} \psi \\ \theta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{atan}\left(\frac{-(dz_{02}f_{10}l_2 - dz_{01}f_{00}l_1 - dz_{03}f_{20}l_3)}{dx_{02}f_{10}l_2 - dx_{01}f_{00}l_1 - dx_{03}f_{20}l_3}\right) \\ \operatorname{asin}\left(\frac{dy_{02}f_{10}l_2 - dy_{01}f_{00}l_1 - dy_{03}f_{20}l_3}{|R_{\text{св}}|}\right) \\ \operatorname{atan}\left(\frac{-(dy_{01}f_{02}l_1 - dy_{02}f_{12}l_2 + dy_{03}f_{22}l_3)}{dy_{01}f_{01}l_1 - dy_{02}f_{11}l_2 + dy_{03}f_{21}l_3}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\operatorname{atan}\left(\frac{dz_{01}f_{00}l_1 - dz_{02}f_{10}l_2 + dz_{03}f_{20}l_3}{dx_{01}f_{00}l_1 - dx_{02}f_{10}l_2 + dx_{03}f_{20}l_3}\right) \\ -\operatorname{asin}\left(\frac{dy_{01}f_{00}l_1 - dy_{02}f_{10}l_2 + dy_{03}f_{20}l_3}{|R_{\text{св}}|}\right) \\ -\operatorname{atan}\left(\frac{dy_{01}f_{02}l_1 - dy_{02}f_{12}l_2 + dy_{03}f_{22}l_3}{dy_{01}f_{01}l_1 - dy_{02}f_{11}l_2 + dy_{03}f_{21}l_3}\right) \end{bmatrix} \tag{12}
$$

Таким образом, был разработан способ начальной выставки БИНС для высокоманёвренного летательного аппарата, который не зависит от работы самой БИНС. При использовании этого способа на ВЛА на точность решения задачи навигации и ориентации будут влиять только погрешности работы радионавигационной части системы, а именно, ошибки в определении тройки пар углов азимута и места при помощи метода конического сканирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта правительства Тульской области в сфере науки и техники № ДС/139.

Список литературы.

1. Захарин М.И., Захарин Ф.М. Кинематика инерциальных систем навигации. М.: Машиностроение, 1968. 236 с.

2. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Мясоедов Д.С. Погрешности интегрированной инерциально-спутниковой системы ориентации и навигации подвижного объекта // Оборонная техника. 2005. № 6–7. С. 90–95.

3. Bogdanov M.B. at al. Analysis of Operating Conditions and Measurement Channel Errors Influence on Strapdown Attitude Orientation System Accuracy. 15th Jubilee Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems proceedings, Saint Petersburg, 2008. P. 111–114.

4. Прохорцов А.В. Методы определения параметров ориентации подвижных объектов по сигналам спутниковых радио - навигационных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 1. С. 258-267.

5. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В. Об эффективности различных типов коррекции показаний бинс по сигналам СНС // XIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. 2006. С. 142-144.

6. Прохорцов А.В. Метод повышения точности определения параметров ориентации путем совместной обработки сигналов БИНС и приемной аппаратуры СНС с применением одной антенны по сигналам с трех и более навигационных спутников // Известия Института инженерной физики. 2018. № 3 (49). С. 31-36.

7. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В. Способ определения угловой ориентации объекта. Патент на изобретение RU 2276384 C2, 10.05.2006. Заявка № 2004112586/09 от 27.04.2004.

8. Балабаев О.С., Прохорцов А.В. Сравнительный анализ методов начальной выставки БИНС на подвижном объекте // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 11. С. 389-395.

9. Прохорцов А.В. Исследование эффективности различных типов коррекции показаний БИНС по сигналам СНС // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 11. С. 85-97.

10. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Сухинин Б.В. Метод определения параметров ориентации с помощью СНС, основанный на измерении координат трех его точек // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2006. С. 309.

11. Прохорцов А.В., Смирнов В.А., Минина О.В. Высокоточный способ определения угловой ориентации беспилотных летательных аппаратов по сигналам спутниковой радионавигационной системы // XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. Санкт-Петербург, 2022. С. 316-318.

12. Харисов В.Н. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС.

13. Захарин Н.И., Захарин Ф.М. Кинематика инерциальных систем навигации. М.: Машиностроение, 1958. 236 с.

14. Амосов А.А, Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1994.

15. Макаров Е. Инженерные расчёты в Mathcad 15: Учебный курс. СПБ.: Питер, 2011. 400 с.

16. Дьяконов В.П. Система MathCAD: Справочник. М.: Радио и связь, 1993. 128 с.

Балабаев Олег Сергеевич, студент, olezhkabalabaev@gmail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Прохорцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, veld071@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METHOD FOR INITIAL ALIGNMENT OF THE SINS OF A HIGHLY MANEUVERABLE AIRCRAFT ACCORDING TO ORIENTATION PARAMETERS ON A MOVING BASE

A method is considered for determining the orientation parameters of a highly maneuverable aircraft using a system of ground-based radio beacons for the purpose of initial alignment of a strapdown inertial navigation system (SINS). For the method to work, it is necessary to perform azimuth-angular radio direction finding with the VLA antenna of these beacons using the conical scanning method, and to know the location of these beacons on the ground.

Key words: initial alignment, orientation parameters, highly maneuverable aircraft, phase measurements, strapdown inertial navigation system, conical scanning method.

Balabaev Oleg Sergeevich, student, olezhkabalabaev@gmail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Prokhortsov Alexey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, veld071@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-87-88

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СПОСОБА НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ БИНС ВЫСОКОМАНЁВРЕННОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ПАРАМЕТРАМ ОРИЕНТАЦИИ НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

О.С. Балабаев, А.В. Прохорцов

В работе проводится анализ точности метода определения ориентации высокоманевренных летательных аппаратов (ВЛА), использующего систему наземных радиомаяков. Метод основан на азимутально-угломестном радиопеленговании сигналов от этих маяков, с применением метода конического сканирования и учетом положения радиомаяков на местности. Для оценки точности данного метода вводятся погрешности в модель. Результаты исследования помогут лучше понять эффективность этого подхода и его возможное применение в навигации высокоманевренных ВЛА.

Ключевые слова: точность определения параметров ориентации, начальная выставка, параметры ориентации, высокоманёвренный летательный аппарат, фазовые измерения, бесплатформенная инерциальная навигационная система, метод конического сканирования.

В работе [1] рассмотрен метод определения параметров ориентации с целью начальной выставки БИНС на подвижном основании. Кратко данный метод можно описать следующим образом:

– Заблаговременно на местности устанавливаются наземные радиомаяки и определяются три единичных вектора направлений на радиомаяки относительно антенны, установленной на ВЛА, в географической системе координат (определяется матрица, представляющая собой матрицу, составленную из векторов-направлений на радиомаяки в географической системе координат);

– Определяются 3 пары углов пеленга – углы азимута и места на ВЛА относительно каждого радиомаяка при помощи метода конического сканирования;

– При помощи углов пеленга составляются единичные векторы-направления на радиомаяки в связанной СК (составляется квадратная матрица, определяющая положение ВЛА относительно системы радиомаяков в связанной системе координат);

– Так как матрица, составленная из векторов-направлений на радиомаяки в географической системе координат, может быть найдена при помощи матрицы направляющих косинусов, которая представляет абсолютную ориентацию ВЛА в пространстве, и матрицы, определяющей положение ВЛА относительно системы радиомаяков в связанной системе координат, из данного соотношения выражается матрица направляющих косинусов, уже из которой вычисляются углы Эйлера-Крылова [5-7].

На рисунках ниже приведены результаты моделирования:

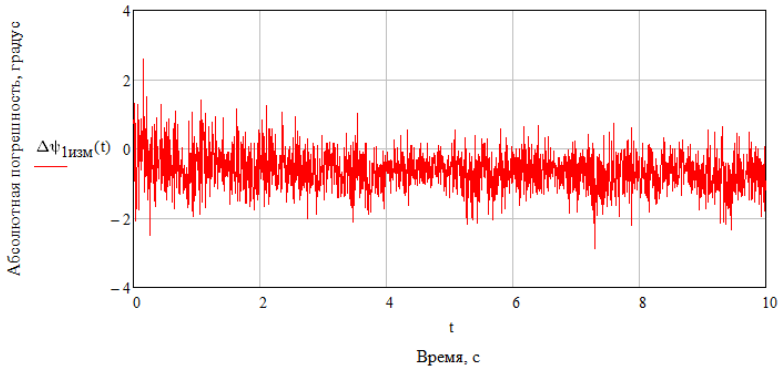


Рис. 1. Абсолютная погрешность в определении угла курса

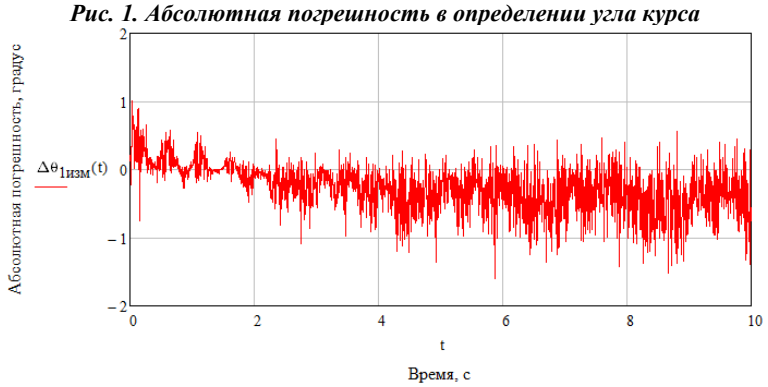


Рис. 2. Абсолютная погрешность в определении угла тангажа

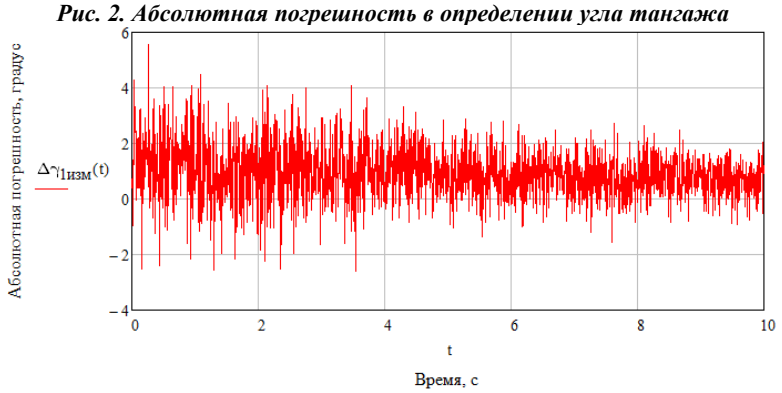


Рис. 3. Абсолютная погрешность в определении угла крена

Для оценки работоспособности предложенного метода определения ориентацииВЛА по сигналам трёх разнесённых радиомаяков, разработана математическая модель и её программная реализация на языке Mathcad. И проведено математическое моделирование.

Для оценки точности методов определения углов ориентации ВЛА математическое моделирование проводилось при следующих условиях: погрешность измерения углов пеленга на радиомаяки в среднем 0,5 градуса. При этом погрешность определения погрешность определения ориентации ВЛА составила в среднем 3-5 градуса. Результаты исследования подтвердили работоспособность и эффективность предложенных методов определения параметров ориентации ВЛА. Точность определения зависит от точности приёмника, используемого для пеленгования наземных радиомаяков. Были определены основные технические требования к системе радиомаяков и приёмной антенне. Таким образом, предложенный способ определения параметров ориентации позволяет осуществлять начальную выставку БИНС, установленную на ВЛА, при помощи системы радиомаяков и приёмной антенны, что даёт возможность использовать эту информацию в автоматизированной системе управления ВЛА с высокой точностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта правительства Тульской области в сфере науки и техники № ДС/139.

Список литературы.

1. Захарин М.И., Захарин Ф.М. Кинематика инерциальных систем навигации. М.: Машиностроение, 1968. 236 с.

2. Прохорцов А.В., Богданов М.Б., Савельев В.В., Мясоедов Д.С. Погрешности интегрированной инерциально-спутниковой системы ориентации и навигации подвижного объекта // Оборонная техника. 2005. № 6–7. С. 90–95.

3. Захарин Н.И., Захарин Ф.М. Кинематика инерциальных систем навигации. М.: Машиностроение, 1958. Т. 2500, 6.1. 236 с.
4. Амосов А.А, Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1994.
5. Макаров Е. Инженерные расчёты в Mathcad 15. Учебный курс. СПБ.: Питер, 2011. 400 с.
6. Дьяконов В.П. Система MathCAD: Справочник. М.: Радио и связь, 1993. 128 с.

Балабаев Олег Сергеевич, студент, olezhkabalabaev@gmail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Прохорцов Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, veld071@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF THE ACCURACY OF THE METHOD FOR INITIAL ALIGNMENT OF THE BINS OF A HIGHLY MANEUVERABLE AIRCRAFT ON A MOBILE BASE

O.S. Balabaev, A.V. Prokhortsov

The paper analyzes the accuracy of the method for determining the orientation of highly maneuverable aircraft (HAVs), using a system of ground-based radio beacons. The method is based on azimuth-angular radio direction finding of signals from these beacons, using the conical scanning method and taking into account the position of the radio beacons on the ground. To assess the accuracy of this method, errors are introduced into the model. The results of the study will help to better understand the effectiveness of this approach and its possible application in the navigation of highly maneuverable VAVs.

Key words: accuracy of determination of orientation parameters, initial alignment, orientation parameters, highly maneuverable aircraft, phase measurements, strapdown inertial navigation system, conical scanning method.

Balabaev Oleg Sergeevich, student, olezhkabalabaev@gmail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Prokhortsov Alexey Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, veld071@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 533.6.011.55
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-89-90

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ТЕЛА ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

П.В. Волков

В статье рассматривается возможность численного моделирования обтекания тела многокомпонентным высокоскоростным химически неравновесным потоком воздуха с использованием нерегулярных ортогональных относительно контура ЛА сеток дискретизации, отличающихся степенью локального сгущения. Проводится сравнительный анализ температур газа в пограничном слое по контуру тела с учетом и без учета диссоциации компонентов потока, оцениваются концентрации атомарных кислорода и азота.

Ключевые слова: аэродинамический нагрев, высокоскоростной поток, сетка дискретизации, химически неравновесные газодинамические потоки, диссоциация.

Полет тела в атмосфере на больших скоростях (более 1700 м/с) характеризуется высокими аэродинамическими нагрузками – силовыми и тепловыми. При этом температура газа около тела может достигать относительно высоких значений [1].

Тепловое воздействие высокоскоростного газа может негативно влиять как на прочностные характеристики материалов элементов тела, так и на его внутренние элементы. Также пагубное влияние на материал оказывает атомарный кислород, обладающий высокой химической активностью. В этой связи при проектировании и разработке одной из важнейших задач является определение возможных тепловых нагрузок и концентрации диссоциированного кислорода на поверхности.

Для теоретического решения такой сложной задачи, как исследование течения турбулентных многокомпонентных потоков, возникает необходимость решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных или интегральных уравнений, выражающих законы сохранения. Многомерность и сильная нелинейность рассматриваемых явлений таковы, что численные подходы представляют практически единственную возможность для их достаточно полного теоретического исследования. Поэтому в данной работе для определения распределения температуры вблизи поверхности тела было реализовано численное моделирование в программном комплексе Gas2.

При использовании численных методов возникает необходимость задания криволинейных границ поверхности тела и неравномерной дискретизации области потока. При этом одним из наиболее ответственных этапов является создание сетки дискретизации рабочей области. Для программного комплекса Gas2 была реализована программа, позволяющая строить нерегулярные ортогональные относительно контура тела сетки дискретизации, имеющие локальное сгущение ячеек около контура. Введение нерегулярной сетки с локальным сгущением ячеек объясняется высокими градиентами температур газа около поверхности, точное разрешение которых возможно при увеличенной степени дискретизации расчетной области в данных местах.

В зависимости от соотношения скоростей протекания физико-химических и газодинамических процессов могут реализоваться различные типы течений. Если реакции идут значительно быстрей, чем меняется термодинамическое состояние частицы, то в каждой точке потока состав и вообще состояние газа можно считать равновесным, соответствующим бесконечно долгому пребыванию при местных температуре и давлении. В другом предельном случае физико-химические процессы не успеют даже начаться, как частица покидает данную область течения, так что состав газа в ней остается неизменным («замороженные» течения). И, наконец, существует обширная промежуточная область неравновесных течений, к каким относятся рассматриваемые в данной работе случаи обтекания высокоскоростным потоком тела.

Все свойства среды: ее плотность, теплоемкость и др. зависят от температуры, давления и состава среды, что должно учитываться моделью течения газа. Влияние переменности свойств среды отражается не только на макроскопических параметрах, но и на параметрах турбулентности. Это объясняется тем, что, с одной стороны, средние значения теплофизических свойств могут быть непостоянными в пространстве и во времени, и, с другой, тем, что в потоке происходят пульсации величин теплофизических свойств, связанных с пульсациями температуры, состава среды и давления.

Наиболее общей математической моделью течения газа в рассматриваемых случаях является система уравнений Навье-Стокса. Данные уравнения применяются для исследования как ламинарных, так и турбулентных течений. Однако, из-за большого различия масштабов турбулентности непосредственное их использование для моделирования турбулентных течений требует неприемлемых затрат ресурсов ЭВМ. В настоящее время расчеты в большинстве случаев проводятся с использованием уравнений Рейнольдса, описывающих изменение осредненных значений газодинамических функций. Эти уравнения замыкаются с помощью полуэмпирических теорий турбулентности. Принимая некоторые допущения, уравнения Рейнольдса можно записать в таком же виде, как и уравнения Навье-Стокса, и использовать для решения обеих систем одни и те же численные методы [2, 3].

Прямое моделирование с помощью численных методов сложных переходных и турбулентных движений в широком диапазоне изменения параметров потока является одной из актуальнейших и сложных проблем современной механики сплошных сред [4]. Основная трудность при рассмотрении указанных задач — построение численной модели турбулентности. Для построения математического описания движения газовой смеси в качестве модели турбулентности в данной работе была выбрана стандартная полуэмпирическая двухпараметрическая $\epsilon-\varepsilon$ диссипативная модель турбулентности.

Численные методы в механике сплошных сред используют дискретное представление среды, эйлеровы или лагранжевы ячейки, крупные частицы, конечные элементы, дискретные вихри и т.д. [5, 6]. В настоящее время при численном решении уравнений Навье-Стокса большинство исследователей отдает предпочтение конечно-разностным методам, использующим как явные, так и неявные схемы.

Для газодинамических задач, характерных при инженерном анализе процессов аэродинамики, более целесообразно исходить из концепции непрерывности, рассматривая вместо частиц поток массы через границы эйлеровых ячеек. В последние годы ряд численных экспериментов по исследованию сложных газодинамических течений был проведен с помощью нестационарного метода крупных частиц [7]. Такой подход использует расщепление физических процессов на временном шаге и установление процесса для решения стационарных задач. Общий принцип расщепления по физическим процессам, с помощью которого выстраиваются последовательно численные модели этого метода для уравнений Эйлера, Навье-Стокса, основан на том, что моделируемую среду заменяют системой из множества частиц, которые распределены в текущий момент по ячейкам эйлеровой сетки в координатном пространстве. Здесь используется совместное эйлерово-лагранжево представление. Область решения разбивается неподвижной, фиксированной по пространству (эйлеровой) расчетной сеткой, а сплошная среда трактуется дискретной моделью - рассматривается совокупность частиц (лагранжева сетка частиц), которые и движутся через эйлеровы ячейки. Частица служит для определения параметров самой жидкости (массы, энергии, скорости), в то время как эйлерова сетка используется для определения параметров поля (давления, плотности, температуры). В настоящее время для решения задач о движении вязких высокоскоростных потоков метод крупных частиц является одним из наиболее эффективных.

Для расчета химического состава и свойств высокотемпературных газовых смесей была необходима информация о термодинамических свойствах индивидуальных веществ. В настоящее время существует значительное количество отечественной и зарубежной справочной литературы, содержащей информацию по этой тематике [8, 9, 10].

Алгоритм численного расчета включает в себя блок расчета газодинамических и блок химических процессов, что позволяет провести компьютерное моделирование процесса обтекания как с учетом, так и без учета химических реакций. Объектом исследования в данной работе является тело, имеющее характерный размер, диаметр цилиндрического основания 90 мм и относительное удлинение 3,32. При этом воздействие воздушного потока рассматривалось при скорости полета 2340 м/с. Движение проводилось в плотных слоях атмосферы (наиболее напряженные условия с точки зрения аэродинамического нагрева) при атмосферном давлении 101325 Па и температуре 293 К.

Построение ячеек осуществляется следующим образом – на контуре расчетной области выбирается граница, от которой необходимо создать ортогональную сетку. Задается минимальная и максимальная величины ячеек, их коэффициент “роста” (т. е. относительный размер ячейки на следующем слое). Ячейки строятся послойно, с каждым слоем увеличиваясь. В данной работе расчеты проводились при минимальных размерах ячеек 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4 мм, максимальные размеры – 5,0 мм. Примеры построенных сеток дискретизации представлены на рис. 1.

При решении задачи на поверхности тела использовалось допущение об адиабатичности стенки (стенка теплоизолированная) и принималось условие проскальзывания. Применение данных видов граничных условий связано с тем, что условие прилипания на поверхности требует применение значительного измельчения ячеек в пристеночной зоне, а, следовательно, большого расчетного времени.

Набегающий поток рассматривался как смесь газов: кислород (20,946 %), азот (78,084 %) и аргон (0,97 %). Также учитывались большие скорости потока – скорости протекания химических процессов оказываются соизмеримы со скоростями физических процессов массообмена в зоне реакций и поэтому реакции диссоциации рассматривались в кинетической постановке.

При больших скоростях полета и температурах влияние химических реакций настолько велико, что поле газодинамических параметров может резко изменяться. Поэтому газодинамическую и химическую подсистемы интегрировались совместно с использованием одного шага интегрирования.

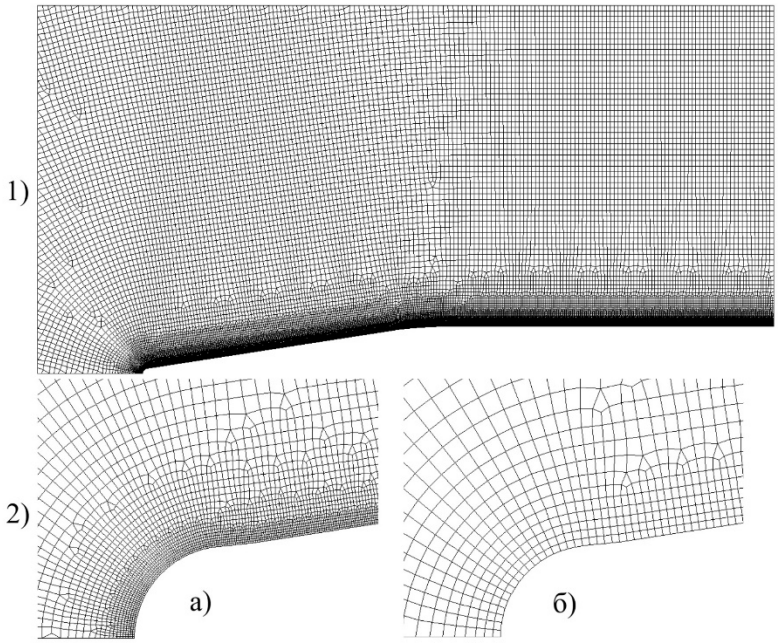


Рис. 1. Примеры сеток дискретизации расчетной области: 1 – общий вид; 2 – область со сферическим затуплением: а – минимальный размер ячеек 0,1 мм; б – минимальный размер ячеек 0,4 мм

Расчет газодинамики обтекания тела с учетом диссоциации воздуха численными методами с учетом химической кинетики занимает очень длительное время, и для сокращения времени расчета был произведен поиск химической модели диссоциации воздушной смеси, содержащей минимальное количество химических реакций и реагирующих компонентов, однако при этом позволяющая получить достоверные результаты. В результате анализа возможного состава реагирующего газа в условиях движения аппаратов в атмосфере Земли с высокой скоростью выбран оптимальный набор из 8 компонентов, участвующих в химических реакциях: N_2O, NO_2, Ar, N_2, O_2, NO, N, O. Предполагается, что скорости полета не превышают значений, при которых реакции ионизации дают незначительный вклад в полную энергию газа в ударном слое.

Для атмосферы Земли основные стехиометрические уравнения реакций диссоциации и обменных реакций представлены в таблице.

Перечень реакций в воздушной атмосфере

Номер реакции	Реакция
1	N + NO <=> N_2 + O
2	N + O2 <=> NO + O
3	N_2O + O <=> N_2 + O_2
4	N_2O + O <=> 2NO
5	N2O + M <=> N2 + O + M
6	N + O + M <=> NO2 + M
7	NO_2 + O <=> NO + O2

Результаты численного моделирования процесса обтекания тела потоком в виде распределения температур газа около поверхности представлены на рис. 2 (без учета химических реакций) и на рис. 3 (с учетом химических реакций). Расчеты проводились с различными степенями локального сгущения сетки дискретизации около контура.

Из вышеприведенных результатов видно, как учет химический реакций способствует значительному снижению температуры в области затупления, где наблюдается высокая интенсивность диссоциации. В остальной части тела, несмотря на отсутствие диссоциации, температура незначительно отличается вследствие изменений теплофизических свойств воздуха, вызванных включением в его состав унесенных с области сферического затупления химически прореагированных компонентов.

Уменьшение минимального размера ячеек около контура способствует уточнению кривой распределения температуры, особенно в области за скачком уплотнения. При этом уточненное распределение температуры в области затупления отличается незначительно.

Диссоциация азота при данных скоростях протекает менее интенсивно, чем у кислорода, так как диссоциирует при больших температурах. На рис. 4 продемонстрировано распределение концентрации атомарного кислорода по контуру обтекателя при различных сетках дискретизации, на рис. 5 – распределение атомарного азота в области затупления (наиболее теплонапряженная зона, характеризующаяся высокими температурами, при которых азот способен диссоциировать).

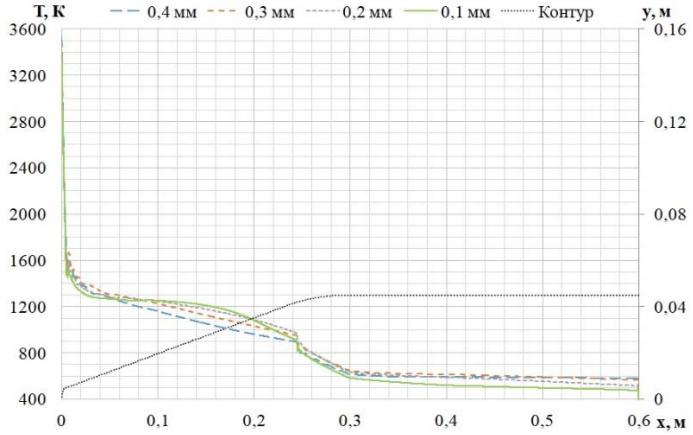


Рис. 2. Распределение температуры газа около поверхности тела вдоль оси без учета химических реакций

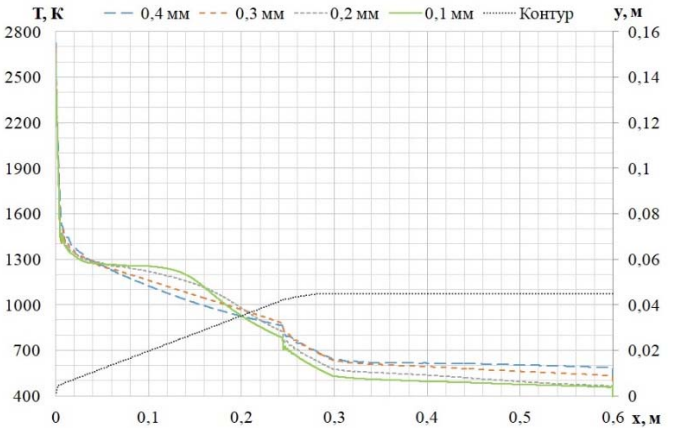


Рис. 3. Распределение температуры газа около поверхности тела вдоль оси с учетом химических реакций

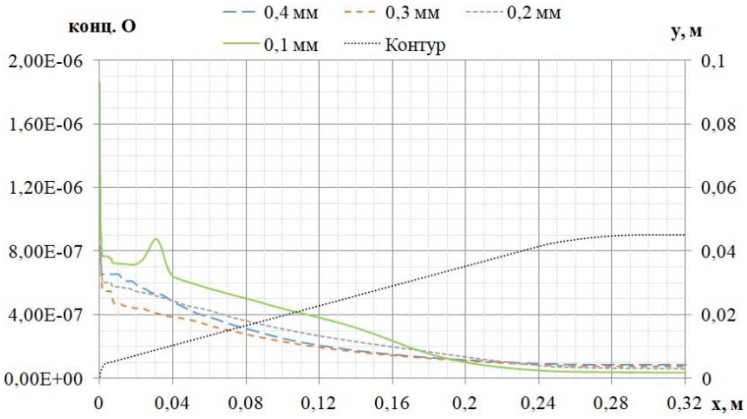


Рис. 4. Распределение концентрации атомарного кислорода по контуру тела

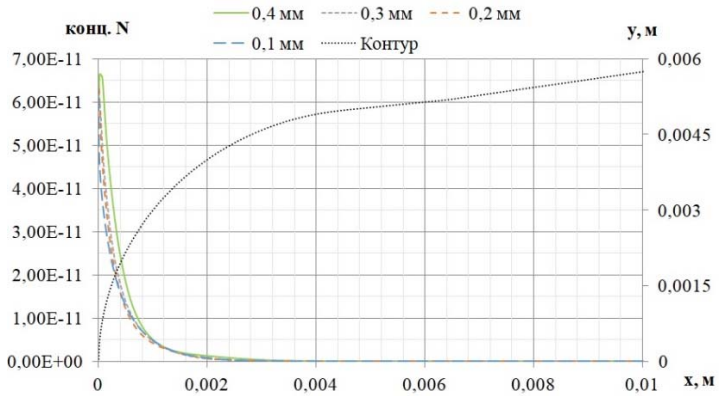


Рис. 5. Распределение концентрации атомарного азота по контуру тела в области сферического затупления

Из результатов видно, как атомарные кислород и азот образуется в наиболее высокотемпературной зоне торможения потока на носике тела, сносятся и движутся вдоль поверхности тела. При этом концентрация атомарного кислорода на порядок превосходит азот вследствие меньших температур начала диссоциации. Уменьшение размеров ячеек около контура способствуют уточнению результатов, а при размерах 0,1 мм на конической части наблюдается область с повышенной концентрацией атомарного кислорода. Данный эффект может быть вызван задержавшимися реакциями диссоциации – молекулы аккумулируют необходимое количество энергии и диссоциируют через малое количество времени, за которое их успевает унести от носовой части. Также данный эффект может быть вызван неточностью расчетов.

Численное моделирование процесса обтекания тела высокоскоростным потоком воздуха с учетом диссоциации компонентов значительно влияет на результаты теплового воздействия по сравнению с расчетами химически нереагируемого потока. Также данные расчеты позволяют оценивать концентрации атомарного кислорода, обладающего высокой химической активностью – он вполне может начать взаимодействовать с материалом тела и привести к разрушающему взаимодействию поверхности. Полученные результаты актуальны при выборе материалов для тел, подверженных высокоскоростному обтеканию.

Степень дискретизации расчетной области вблизи поверхности тела, где наблюдается высокие температурные градиенты в относительно малых толщинах слоев газа, влияет на точность результатов распределения температур и концентраций, но интенсивное локальное сгущение приводит к увеличению расчетного времени. Это принуждает к выбору таких сеток дискретизации, степень локального сгущения которых способно обеспечить удовлетворительные с инженерной точки зрения результаты за приемлемое время расчетов.

Список литературы

1. Авдуевский В.С., Данилов Ю.И., Кошкин В.К. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1975. 624 с.

2. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960. 715 с.

3. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях. М.: Энергия, 1979. 408 с.

4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.

5. Годунов С.К. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400с.

6. Белоцерковский О.М., Головачов Ю.П., Грудницкий В.Г., Давыдов Ю.М., Душин В.К., Лунькин Ю.П., Магомедов К.М., Молодцов В.К., Попов Ф.Д., Толстых А.И., Фомин В.Н., Холодов А.С. Численное исследование современных задач газовой динамики. Под ред. Белоцерковского О.М. М.: Наука, ВЦ АН СССР, 1974, 398 с.

7. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982.

8. Термические константы веществ. Справочник в 10 т./ В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин. Под ред. акад. В. П. Глушко. М.: ВИНИТИ АН СССР, 1962-1978.

9. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник в 2 т. Под ред. акад. В. П. Глушко. М.: Наука, 1962.

10. JANAF, "Thermochemical Tables, National Standards Reference Data Series" Report NSRDS-NBS 37: also Dow Chemical Company, distributed by Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, PB168370 (1965) and subsequent updates (1965).

Волков Павел Владимирович, студент, citizensdc_011s@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Научный руководитель: Дунаев Валерий Александрович, д-р техн. наук, профессор, dwa222@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

FEATURES OF NUMERICAL SIMULATION OF AERODYNAMIC HEATING OF A BODY BY A HIGH-SPEED AIR FLOW

P.V. Volkov

The article considers the possibility of numerical simulation of the flow around a body by a multicomponent high-speed chemically nonequilibrium air flow using irregular orthogonal discretization grids with respect to the contour, differing in the degree of local concentration of cells. A comparative analysis of the gas temperatures in the boundary layer along the contour of the body is carried out, taking into account and without taking into account the dissociation of the flow components, the concentrations of atomic oxygen and nitrogen are estimated.

Key words: aerodynamic heating, high-speed flow, grid of discretization, chemically nonequilibrium gas dynamic flows, dissociation.

Volkov Pavel Vladimirovich, student, citizensdc_011s@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Scientific supervisor: Dunaev Valery Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, dwa222@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-94-95

РЕВИТАЛИЗАЦИЯ ГОРОДСКОГО ПРОСТРАНСТВА

К.А. Головин, А.Б. Копылов, А.Г. Свандлунова

Реновация — одна из стратегий адаптации сложившейся архитектурной среды и отдельных объектов, в том числе исторических, к требованиям современности. В статье рассматриваются примеры реновации архитектурных объектов в городах США, Испании, Японии и России. При этом отмечаются такие сильные стороны проектов, как усиление туристической привлекательности исторических районов, создание уникальных объектов, сочетание старой и новой архитектуры без фальсификации, сохранение элементов традиционной архитектуры при адаптации районов к современным техническим условиям. В заключение выделены такие варианты сохранения и адаптации исторической среды городов и региональных архитектурных традиций, как возрождение средовой определенности, единая система архитектурного дизайна и визуальная преемственность среды, воссоздание утраченной застройки, а также сохранение культурной и национальной идентификации, исторической памяти и культурного разнообразия.

Ключевые слова: реновация, ревитализация, историческая городская среда.

Каждая страна обладает уникальными традиционными объектами, представляющими особую ценность для ее культуры. В то же время устойчивое развитие, в том числе за счет культурного разнообразия, является актуальной темой на протяжении последнего десятилетия, что отражено, в частности, в резолюции ООН. Архитектура города, особенно его историческая застройка, имеет большое значение и указывает на его происхождение и развитие, поэтому такая застройка должна быть уникальной и узнаваемой.

Традицию определяют, как элементы социального и культурного наследия, передающиеся от поколения к поколению и сохраняющиеся в определенных обществах и социальных группах в течение длительного времени. Традиции очень важны в архитектуре, но это не означает, что старое жилище или древний город смогут соответствовать современным требованиям и решать современные проблемы. Тем не менее тщательное изучение прошлого важно для критического использования наследия.

В настоящее время большая часть исторически ценных объектов архитектуры в России находится в аварийном состоянии [8]. Это не может не быть поводом для беспокойства, потому что город, потерявший свои культурные ценности, теряет свою «душу» и больше не может выполнять функции образования, воспитания и развития творческого потенциала. Приблизительно половина объектов не используется, независимо от их архитектурных и конструктивных особенностей, физический износ которых негативно влияет на вероятность их уничтожения и утраты объекта. Усугубляет ситуацию современная популярная культура, которая, в силу своих ограничений, не внушает человеку уважения к традициям.

Под термином «историческая городская среда» следует понимать наиболее старые (исторические) части города и городские территории, включающие первоначальное градообразующее ядро, которые приобрели культурологическую и региональную ценность по мере старения городской среды и образующих ее элементов.

Основная задача каждого архитектора, проектирующего в исторической городской среде, включает в себя два важных аспекта:

1. Защита окружающей архитектурно-исторической среды, исторической целостности застройки.

2. Преобразование окружающей архитектурно-исторической среды в соответствии с потребностями человека, совмещающее в проекте старое и новое, сохраняющее архитектурные традиции.

В своей работе кандидат архитектуры И.М. Алексеев [1] выделяет несколько принципов сохранения архитектурных традиций:

I. реновация посредством возрождения средовой определенности;

II. формирование единой системы средств архитектурного дизайна, соответствующей характеру исторического окружения;

III. воссоздание утраченной застройки посредством реконструкции уже построенных объектов или возведения новых, сомасштабных историческому пространству;

IV. образ как стилистический фактор, который обязательно должен быть отражен при реновации объекта исторической архитектурной среды;

V. сохранение культурной и национальной самоидентификации и воспитание патриотизма;

VI. сохранение визуальной преемственности среды;

VII. сохранение и передача исторической и культурной памяти;

VIII. сохранение культурного разнообразия как один из способов поддержания устойчивого развития.

Все эти принципы применимы не только к уникальным объектам, но и к рядовой городской среде, а также способствуют адаптации объектов архитектуры к современным условиям. К числу основных следует отнести такие стратегии адаптации, как:

[1] Реставрация — укрепление и восстановление архитектурных сооружений, поврежденных, искаженных или разрушенных: временем, вредными условиями в период эксплуатации, губительными или неумелыми воздействиями, а также предохранение от их дальнейшего разрушения посредством материалов, близких по свойствам к первоначальным [4].

[2] Реконструкция — изменение параметров объекта капитального строительства, его частей (высоты, количества этажей, площади, объема), в том числе надстройка, перестройка, расширение объекта капитального строительства, а также замена и (или) восстановление несущих строительных конструкций объекта капитального строительства, за исключением замены отдельных элементов таких конструкций на аналогичные или иные улучшающие показатели таких конструкций элементы и (или) восстановления указанных элементов.

[3] Реновация, которая подразумевает снос зданий или целых кварталов города, не являющихся объектами культурного наследия, а также ветхого или аварийного жилья. Реновация может включать строительство новых

объектов как на месте сносимых зданий, так и на новых территориях застройки, при этом изначальная функция здания/сооружения может сохраняться или меняться [9].

[4] Ревитализация, которая в контексте урбанистики обозначает процесс воссоздания и оживления городского пространства. Основной принцип ревитализации заключается в раскрытии новых возможностей старых территорий и построек. В процессе ревитализации используется комплексный подход с целью сохранения самобытности, аутентичности, идентичности и исторических ресурсов городской среды [2].

Реновация и реконструкция объектов связаны с восстановлением эксплуатационных показателей и усилением несущих конструкций зданий. Но немаловажным фактором является воссоздание и сохранение исторического облика здания — его фасадов. Такие восстановительные работы нуждаются в индивидуальном подходе, отличающемся от проектных решений в процессе нового строительства.

Историческая застройка в настоящее время считается одним из ключевых элементов городской среды и не уступает по степени значимости памятникамархитектуры, а ее потеря приводит к искажению внешнего вида города, что пропорционально ущербу, причиненному разрушением памятников и ансамблей. Английский культуролог Кевин Линч пишет: «Мы предпочитаем такой мир, который можно последовательно приспосабливать к себе на фоне ценных реликвий прошлого, мир, в котором рядом со следами истории можно было бы сделать и собственную отметину» [5].

Сама реновация осуществляется за счет следующих методов (с заменой или сохранением первичной функции):

1. снос и новое строительство;
2. модернизация инженерных коммуникаций и усиление несущих конструкций;
3. перепланировка и перепрофилирование помещений;
4. пристройка, надстройка площадей.

Процесс современного использования существующих исторических объектовчасто зависит от инвестиционной и личной заинтересованности потенциальных застройщиков, а также качества рекламных компаний по привлечению покупателей и арендаторов этих объектов. Можно выделить некоторые основополагающие критерии, по которым происходит выбор метода реновации:

5. социальная важность объектов;
6. расположение в структуре города или за его пределами;
7. историческое значение;
8. экологические характеристики;
9. урон, нанесенный объекту и площадке, и его общее состояние;
10. потенциал для повторного использования.

Для понимания процессов архитектурной реновации городской застройки на сегодняшний день нужно знать, что с архитектурой было в прошлом, и думать о том, что ее ждет в будущем. В настоящее время уже накоплен некоторый опыт реновации в различных городах мира. Рассмотрениезарубежного и отечественного опыта адаптации архитектуры поможетвыяснить, какие методы позволяют сохранить архитектурные традиции для зданий и сооружений.

В мировой практике присутствует масса удачных примеров в области ревитализации. Рассмотрим некоторые примеры удачной реализации стратегий адаптации исторических объектов к требованиям современности.

Райан Мэдсон, градостроитель и ландшафтный архитектор, преподаватель Колледжа искусств и дизайна города Саванны, описывает опыт частичной реновации района —национального памятника Лэндмаркдистрикт и входящего в его структуру Колледжа искусств и дизайна (Savannah College ofArt and Design, штат Джорджия, США), основанного в 1978 г. Колледж известен благодаря своей деятельности по сохранению наследия и прекрасному городскому кампусу. Он занимает 80 зданий в Саванне, и почти все они — исторические постройки. Малоиспользуемые и заброшенные здания, разбросанные по всему Лэндмарк-дистрикт, были приобретены колледжем и наполнены новой жизнью — как академической, так и общественной [7]. Эти здания включают бывшие школы, офисные здания, дома, таунхаусы и промышленные склады. Один из первых факультетов колледжа был размещен на выведенном из эксплуатации оружейном заводе. Главное административное здание колледжа размещено в больнице, в бывшей синагоге — отдел обслуживания студентов, а в руинах железнодорожного депо, построенного в первой половине XIX в., — художественный музей. Тротуары и зеленые площади исторического центра де-факто являются частью комплекса. Колледж является признанным лидером в области охраны памятников культуры и заслужил репутацию сотрудника правоохранительных органов в Саванне по защите архитектурного облика города. Процветание города поддерживается местными жителями и диверсифицированной экономикой. Однако источником наибольшего экономического воздействия на город извне является туризм. Люди путешествуют по таким местам, как Саванна, чтобы увидеть подлинные районы, сохранившиеся здания, места идостопримечательности.

Архитектор Рикардо Бофилл в 1973 г. неподалеку от Барселоны обнаружил в полуразрушенном состоянии цементный завод, который работал еще во времена Первой мировой войны, а после закрытия постепенно разрушался, и преобразил его в жилое и рабочее пространство [11]. Бофилл и его команда увидели потенциал заводских построек и начали их реконструировать — в течение 45 лет старое здание было полностью преобразовано в один из самыхуникальных и современных комплексов.

Метод реставрации сооружения за счет использования новых строительных технологий был применен в Испании в 2013 г., где архитекторы из Carquero Arquitectura взялись восстанавливать замок Матрера в городе Кадис, которыйбыл построен еще в IX в. и за более чем 1000 лет значительно износился, частично рухнув и оставив за собой почти бесформенную каменную гору руин. Главной задачей архитекторов было восстановление утерянного объема. Суть такой реставрации сами архитекторы видели в том, чтобы,избегая ложной исторической фальсификации, отменяющей все следывремени, создать проект, который отражает свое собственное прошлое в его физической последовательности, сохраняя эстетическое и историческоезначение, используя современные материалы, но аналогичные тем, изкоторых изначально было построено сооружение [10].

В Японии особый подход к традиционным ценностям культуры. На современном этапе развития Япония, перенимая чьи-то достижения, так же как и в Средние века, приспосабливает их под собственные нужды, исходя прежде всего из своих культурных традиций, не отрицая их, а лишь при необходимости модифицируя. Большое

внимание уделяется представлению специалистам других стран антисейсмических конструкций, ведь в связи с их особой актуальностью для страны в их разработке были достигнутызначительные успехи. Отсюда и выбор традиционных строительных материалов — дерева и бумаги (или стилизация под них). Так, при работе надархитектурным обликом здания резиденции правительства префектуры г. Нагоя был использован метод врезки добавочных компонентов (новых объемов) в существующую структуру здания, что изменило пластику фасада, создавав отсылку к традициям архитектуры Японии.

Сложившееся в России направление традиционной архитектуры, имеющее устойчивые и ярко выраженные конструктивно-технические и архитектурно- художественные особенности, — это народное деревянное зодчество. Оно включало в себя возведение жилых домов, крепостей, храмов, церквей, часовен и даже малых архитектурных форм — целый пласт культурной идентичности исторической среды русских городов и других населенных пунктов. Проблема заключается в недолговечности дерева как материала строительства и в связанных с этим трудностях его сохранения и поддержания в эксплуатационном состоянии. Большая часть традиционной деревянной архитектуры утрачивается для потомков, и одним из вариантов сохранения хотя бы представлений об этой части российской истории является воссоздание копий утраченных значимых исторических объектов.

В 2010 г. на незастроенной территории музея-заповедника «Коломенское» на юге Москвы была возведена историческая копия дворца царя Алексея Михайловича XVII в. в натуральную величину, фасады и планировки которой точно повторяют исходное сооружение за счет данных обмеров и описей здания [3]. Единственное отступление от оригинала было в использовании железобетонного каркаса с целью уберечь здание от пожара.

Сибирский пример работы с деревянным наследием — известный опыт 130-го квартала в Иркутске — масштабный пример того, как фрагменты исторической среды могут вовлекаться в современную хозяйственно-коммерческую деятельность, уничтожения той самой исторической городской среды. Ее физический износ, неблагоустроенность и несоответствие современным функциям формируют интерес инвесторов сцелью реновации, реконструкции, восстановления данной исторической застройки, причем со значительной экономической выгодой [6]. Данный проект представляет собой комплексную регенерацию территории, т.е. достаточно редкий для России опыт возрождения исторической среды. Внего входили новое строительство, реставрация, реконструкция, восстановление исторических объектов и целостных фрагментов деревянной среды с усилением современных функций: обслуживания, предпринимательства, музеефикации.

М.Г. Меерович писал: «Возрождение 130-го квартала вызвало взрыв в общественном сознании и кардинально его изменило. Люди перестали относиться к исторической деревянной застройке как к ‒мерзким гнилушкам‖. Возникло восприятие их как ‒ждущих своей огранки алмазов‖. Если десять лет назад люди с ненавистью к исторической застройке твердилитолько одно: выжечь начисто и построить современную архитектуру, — потому что именно она ассоциировалась у них с ‒современностью и будущим»; то сейчас люди говорят: историческую застройку нужно восстанавливать, мы хотим иметь такое же и в других местах города, это и есть будущее нашего родного Иркутска, это наша исконная сибирская народная архитектура».

Таким образом, на основе анализа теории и практики были выявлены такие методы сохранения архитектурных традиций при реновации зданий и сооружений, как:

11. полная реновация здания, сохранение его первоначального облика;
12. формирование композиции на базе ранее имеющихся систем за счет «наложения» новых строительных технологий и использованных материалов;
13. сравнение проектируемого объекта с теми или иными качествами образного аналога. Применяется, если объекту следует добавить новые свойства;
14. врезка добавочных компонентов и строений в имеющиеся пространственно-планировочной композиции сооружения;
15. метод, позволяющий создавать своего рода композиции из отдельных вставок или накладок, изменяя пластику фасадов;
16. изменение функций объекта, превращение объекта в музей и т.д.;
17. реновация и полное воссоздание объекта по исторической справке и сохранившимся графическим материалам.

Данные методы позволят сохранить ценные объекты, восстановить их нановом уровне и включить в современную жизнь, основываясь на традициях прошлого, и создавать что-то новое и интересное благодаря широчайшему творческому потенциалу архитектурного наследия.

Список литературы

1.Алексеев А.А. Реконструкция и реновация исторически сложившихся площадей в центре Москвы: автореф. дис. ... канд. архитектуры. М., 2006. 24 с.

2.Барабанов А.А. Социально-культурные и семантические принципы ревитализации индустриального наследия // Эко-потенциал. 2013. № 3–4. С. 237–248.

3.Вострышев М.И., Шокарев С.Ю. Вся Москва от А до Я. Энциклопедия. М.: Алгоритм, 2011. 1064 с.

4.Кедринский А.А. Основы реставрации памятников архитектуры.Обобщение опыта школы ленинградских реставраторов. М.: Изобразительное искусство, 1999. 184 с.

5.Линч К. Образ города. М.: Стройиздат, 1982. 149 с.

6.Меерович М.Г. Комплексная реконструкция квартала 130 в г. Иркутске // Архитектура изменяющейся России: Состояние и перспективы. М.: КомКнига, 2011. С. 334–356.

7.Мэдсон Р. Как сохраняют архитектурное наследие в США // Strelka Mag. 6 мая 2016 г. [Электронный ресурс] URL: https://strelkamag.com/ru/article/projective-preservation-a-manifestofor-savannah (дата обращения: 27.04.2020).

8.Сотников Б.Е. Архитектурно-историческая среда: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 208 с.

9.Хохлов О.Б. Оценка эффективности проектов и программ реновации жилищного фонда: автореф. дис. ... канд. экон. наук. Томск, 2006. 28 с.

10. Двоскина Н. Реконструкция средневекового замка в Испании // AD. 2018. 20 сентября. [Электронный

ресурс] URL: https://www. admagazine.ru/architecture/rekonstrukciyasrednevekovogo-zamka-v-ispanii (дата обращения: 10.05.2023).

11. Жигулина Ольга. Архитектура: Старый цементный завод, превращенный в современный дом-студию // TJ. 2017. 28 февраля. [Электронный ресурс] URL: https://tjournal.ru/art/41487-arhitektura-staryy-cementnyyzavod-prevrashchennyy-v-sovremennyy-domstudiyu (дата обращения: 10.05.2023).

Головин Константин Александрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kagolov-in@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Копылов Андрей Борисович, д-р техн. наук, профессор, toolart@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Свандлунова Антонина Геннадьевна, магистр, anufrievatoni@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

REVITALIZATION OF URBAN SPACE

K.A. Golovin, A.B. Kopylov, A.G. Svandlunova

Renovation is one of the strategies for adapting the existing architectural environment and individual objects, including historical ones, to the requirements of modernity. The article discusses examples of renovation of architectural objects in cities of the USA, Spain, Japan and Russia. At the same time, such strengths of the projects are noted as enhancing the tourist attractiveness of historical areas, creating unique objects, combining old and new architecture without falsification, preserving elements of traditional architecture while adapting areas to modern technical conditions. In conclusion, options for preserving and adapting the historical environment of cities and regional architectural traditions are highlighted, such as the revival of environmental certainty, a unified system of architectural design and visual continuity of the environment, the reconstruction of lost buildings, as well as the preservation of cultural and national identification, historical memory and cultural diversity.

Key words: renovation, revitalization, historical urban environment.

Golovin Konstantin Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, kagolov-in@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kopylov Andrey Borisovich, doctor of technical sciences, professor, toolart@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Svandlunova Antonina Gennadievna, master, anufrievatoni@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 721.02
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-97-98

АКТУАЛЬНОСТЬ ЭКОЛОГИЧНОСТИ В АРХИТЕКТУРЕ

К.А. Головин, А.Б. Копылов, Ю.С. Трофимова

Негативное воздействие современных технологий на окружающую среду привело к формированию у людей нового осознания экологических проблем. Достижение экологичности предполагает рациональное использование природных ресурсов, фундаментальный сдвиг в отношении и обращении человека к природе, серьезные изменения в моделях производства и потребления.

Ключевые слова. энергоэффективность, зеленая архитектура, окружающая среда, экологичность.

На здания и процесс их строительства приходится более 30% общего потребления энергии в мире. Однако это не обязательный критерий в строительстве — на самом деле, это указывает на прекрасную возможность для отрасли внести позитивные изменения. Это возможность, которую многие в строительной отрасли заметили и используют. Экологичное строительство уже не просто тренд – это революционное течение.

Экологичное строительство подразумевает оптимизацию строительного процесса для сведения к минимуму негативного воздействия на окружающую среду и ее жителей при максимальном увеличении положительных аспектов готовой конструкции.

Надлежащее планирование и проектирование могут помочь сооружению квалифицироваться как «зеленое» во время его эксплуатации и даже во время возможного сноса сооружения.

Процесс строительства, от простого дома на одну семью до крупнейшего инфраструктурного мегапроекта, может воздействовать на окружающую среду разными способами, в том числе:

Прямое разрушение экосистем из-за добычи полезных ископаемых, лесозаготовок и других способов добычи сырья.

Загрязнение воздуха из-за использования тяжелой техники, работающей на дизельных или бензиновых двигателях, производящих выбросы.

Отходы, загрязнение воды и воздуха и высокое потребление энергии, необходимые для процессов производства строительных материалов, при этом, по оценкам, от 5% до 8% глобальных выбросов CO2 приходится только на производство цемента.

Высокий уровень выбросов CO2 при транспортировке материалов и оборудования на большие расстояния.

Разливы или другие аварии, которые непосредственно загрязняют почву, воздух и воду токсичными химическими веществами.

Эрозия и сток на строительной площадке, которые могут повредить местные водные пути и влияют на жизнь растений

Эти проблемы могут поставить под угрозу практический результат реализации проектов. Производители строительных материалов, которые сокращают количество отходов, не только помогают окружающей среде; они также, скорее всего, увидят увеличение прибыли за счет комплексного использования ресурсов.

Перечень методов, которые делают строительство более экологичным, можно классифицировать в пять основных категорий.

Энергоэффективность. Здания, построенные с использованием экологически чистых методов, требуют меньше энергии во время строительства и во время эксплуатации. Регулировка планировки, степень изоляции, расположение и выравнивание земли и даже цвет наружных материалов могут повысить энергоэффективность.

Сокращение отходов. При лучшем планировании строительство новой структуры может практически не производить отходов.

Ударопрочные строительные материалы. Директивы по сокращению отходов на месте в сочетании с использованием строительных материалов, которые производят меньше отходов во время производства, значительно снижают воздействие строительства. Не все эти строительные материалы с низким уровнем воздействия являются новыми и незнакомыми; многие из них являются одним и тем же стандартом материалы (такие как мерный пиломатериал для каркаса), просто изготовленные в соответствии с более жесткими стандартами.

Качество воздуха в помещении. Тщательный выбор материалов не только сокращает количество отходов и повышает рентабельность проекта. Материалы внутренней отделки, которые практически не выделяют летучих органических соединений, обеспечивают более здоровую окружающую среду для их жильцов.

Рациональное использование воды. Сведение к минимуму сточные воды и контроль избытка воды за пределами здания могут быть достигнуты с помощью методов экологичного строительства. Здания используют 14% всей питьевой воды, потребляемой в мире, но несколько небольших изменений могут иметь большое значение для экономии безопасной питьевой воды для более важных целей, чем смыв и стирка.

Отдавая предпочтение экологичному строительству, мы помогаем нашей планете и людям максимально сохранить природу двумя способами, касающихся расположения зданий.

1. Сохранить внешнюю среду в месте расположения здания.

2. Сохранить окружающую среду вдали от зданий.

Экологичные здания сохраняют окружающую среду в месте расположения здания

Допустим, мы предлагаем многоэтажный офисный комплекс, рассчитанный на тысячи сотрудников штаба, он требует огромной площади. Поэтому при выборе места для такого строительного комплекса следует учитывать сохранение местной растительности, естественных водотоков и т. д. Следует либо избегать участка с биоразнообразием, либо строительство должно быть спланировано так, чтобы уменьшить нарушение участка.

Ландшафт. Ландшафтный дизайн и внешний дизайн в экологичном здании должен быть таким, чтобы было больше затененных зон, чтобы не было вторжения света, и чтобы выращивались местные виды растений.

Энергоэффективность

Экологичные здания часто включают меры по снижению потребления энергии — как воплощенной энергии, необходимой для извлечения, обработки, транспортировки и установки строительных материалов, так и рабочей энергии для предоставления таких услуг, как отопление и электроэнергия для оборудования. Поскольку высокопроизводительные здания потребляют меньше эксплуатационной энергии, воплощенная энергия приобрела гораздо большее значение и может составлять до 30% от общего энергопотребления в течение жизненного цикла. Чтобы снизить энергопотребление, высокоэффективные окна и изоляция стен, потолков и полов повышают эффективность ограждающих конструкций (барьер между кондиционируемым и некондиционируемым пространством). Другая стратегия, проектирование пассивных солнечных батарей, часто применяется в домах с низким энергопотреблением. Дизайнеры ориентируют окна и стены, размещают навесы, веранды, и деревья, чтобы затенять окна и крыши летом и максимизировать приток солнечного света зимой. Кроме того, эффективное размещение окон (дневное освещение) может обеспечить больше естественного света и уменьшить потребность в электрическом освещении в течение дня. Солнечное нагревание воды дополнительно снижает затраты на электроэнергию. Производство возобновляемой энергии на месте за счет солнечной энергии, энергии ветра, гидроэнергии или биомассы может значительно снизить воздействие здания на окружающую среду.

Эффективность использования воды. Сокращение потребления воды и защита качества воды являются ключевыми задачами устойчивого строительства. Одна из важнейших проблем водопотребления заключается в том, что во многих районах требования к питающему водоносному горизонту превышают его способность к самовосполнению. В максимально возможной степени объекты должны увеличить зависимость от воды, которая собирается, используется, очищается и повторно используется на месте. Защита и сохранение воды на протяжении всего срока службы здания может быть обеспечена путем проектирования двойной сантехники, в которой вода повторно используется при смыве туалета. Сточные воды можно свести к минимуму за счет использования водосберегающих приспособлений, таких как туалеты со сверхнизким смывом и душевые насадки с низким расходом. Биде помогает отказаться от использования туалетной бумаги, уменьшить трафик канализации и увеличить возможности повторного использования воды на месте. Очистка и нагрев воды в месте использования улучшает как качество воды, так и энергоэффективность при одновременном снижении количества воды в циркуляции. Использование несточных и серых вод для использования на месте, например, для орошения, сведет к минимуму нагрузку на местный водоносный горизонт.

Эффективность материалов. Строительные материалы должны помогать контролировать вырубку лесов, производиться на месте на строительной площадке, чтобы свести к минимуму энергии, заложенной в их транспортировке. По возможности, строительные элементы должны производиться за пределами площадки и доставляться на нее, чтобы максимизировать преимущества производства за пределами площадки, включая минимизацию отходов, максимальную переработку (поскольку производство находится в одном месте), высококачественные элементы, лучшее управление охраной труда, меньший уровень шума и пыль.

Зеленые здания сохраняют окружающую среду вдали от зданий. Все мы знаем, что здание строится из цемента, песка, стали, камня, кирпича и множества отделочных материалов. Эти материалы добываются или закупаются далеко от мест расположения зданий. На строительные материалы приходится около 20 процентов парниковых газов, выделяемых зданием в течение его срока службы. Экологичные здания должны использовать продукты, которые являются нетоксичными, пригодными для повторного использования, возобновляемыми и/или перерабатываемыми, где это возможно. Предпочтение отдается продуктам местного производства, чтобы коллективная материальная среда местности оставалась неизменной и, кроме того, экономилось топливо для транспортировки материалов.

Возобновляемые растительные материалы, такие как бамбук (потому что бамбук быстро растет) и солома, пиломатериалы из лесных экологических блоков, размерный камень, переработанный камень, переработанный металл — это некоторые из материалов, используемых в «экологичном» строительстве. Несмотря на то, что постоянно разрабатываются новые технологии, дополняющие существующую практику создания более экологичных структур, общая цель состоит в том, чтобы «экологичные» здания разрабатывались таким образом, чтобы уменьшить общее воздействие застроенной среды на здоровье человека и природную среду.

Независимо от того, насколько устойчивым может быть здание при его проектировании и строительстве, оно может оставаться таковым только в том случае, если оно эксплуатируется ответственно и поддерживается должным образом. Участие персонала по эксплуатации и техническому обслуживанию в процессе планирования и разработки проекта поможет сохранить экологические критерии, разработанные в начале проекта. Каждый аспект зеленого строительства интегрирован в фазу эксплуатации и технического обслуживания здания. Добавление новых «экологичных» технологий также ложится на сотрудников. Хоть и цель сокращения отходов может быть достигнута на этапах проектирования, строительства и сноса жизненного цикла здания, именно на этапе эксплуатации и технического обслуживания применяются экологические методы, такие как переработка и улучшение качества воздуха.

Таким образом, преимущества экологичного строительства включают экономию средств за счет сокращения потребления энергии, воды и отходов; более низкие эксплуатационные и эксплуатационные расходы; повышение производительности и здоровья людей. Следовательно, даже небольшие изменения в производительности и состоянии здоровья приводят к большим финансовым выгодам. Таким образом, можно сделать однозначный вывод, что экологичное (зеленое) строительство сегодня экономически выгодно и имеет финансовый смысл. Архитекторы смогут влиять на будущую застроенную среду, и, продвигая экологичные здания, будут проектировать здоровые, экологически безопасные здания, которые прослужат долгое время.

Список литературы

1. Видищева Е.А., Никифорова В.А., Ковчун А.А., Видищева Д.Д. Экологически эффективное строительство: российский и зарубежный опыт // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2017. №2. С. 116-119.

2. Гозак, А.П. Алвар Аалто [Мастера архитектуры) / А.П. Гозак. М.: Стройиздат, 1976. 176 с.

3. Дэй К. Места, где обитает душа: Архитектура и среда как лечебное средство / Пер. с англ. В.Л. Глазычева. М.: Ладья, 2000. 280 с.

4. Иконописцева О.Г. Эко-дизайн энергоэффективной архитектуры. Анализ основных направлений и тенденций высотного строительства // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки. 2018. №1. С. 41-51.

5. Кондратьев А.В., Грин И.Ю. Экологические стандарты сертификации зеленых зданий // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2014. Том: 1. С. 140-146.

6. Поляков Е.Н., Астафьева М.В. Природа в творчестве Фрэнка Ллойда Райта // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. №1. С. 51-66.

7. Стахеев О.В., Бравова Е.Е. Тенденции в организации энергоэффективной высотной застройки // Региональные архитектурно-художественные школы. 2011. №1. С. 163-165.

8. Portman, John and Associates: Selected and current works / Ed. Womerslay S. The Images Publishing, 2002. 256 p.

Головин Константин Александрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kagolovin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Копылов Андрей Борисович, д-р техн. наук, профессор, toolart@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Трофимова Юля Ссергеевна, магистр, rarenessjul@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

RELEVANCE OF SUSTAINABILITY IN ARCHITECTURE

K.A. Golovin, A.B. Kopylov, Yu.S. Trofimova

The negative impact of modern technology on the environment has led to the formation of a new awareness among people of environmental problems. Achieving sustainability requires the rational use of natural resources, a funda-

mental shift in man's attitude and approach to nature, and major changes in production and consumption patterns.
Key words. Energy efficiency, green architecture, environment, sustainability.

Golovin Konstantin Aleksandrovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, kagolovin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kopylov Andrey Borisovich, doctor of technical sciences, professor, toolart@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Trofimova Yulya Ssergeevna, master, rarenessjul@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 622.242(075.8); 622.23.05
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-100-101

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ УСТАНОВКИ СБШ-250МН-32Т

Т.А. Акименко, Фам Т.Л.

Предложена модель процесса бурения для установки СБШ-250МН-32Т; представлена структурная схема узла бурения и получены аналитические выражения с учетом постоянной времени нагруженного привода; коэффициента передачи нагруженного привода по управляющему напряжению; коэффициента передачи нагруженного привода по подаче; коэффициент передачи нагруженного привода по сопротивлению грунта внедрению бура.
Ключевые слова: модель бурения, момент полезной нагрузки, узел бурения, подача бура, угловая скорость.

На процесс бурения влияют несколько факторов: свойства горных пород, механизмы и способы разрушения породы, взаимодействие бурильного инструмента со скважиной, инструмент для бурения и т.д. В отечественной практике модели процесса бурения сформировались после установления В.С. Федоровым зависимости механической скорости бурения *V* от нагрузки на долото G и частоты его вращения *n*. [13] Анализ литература по данному вопросу показал, что общепризнанной модели процесса бурения нет, так как слишком много факторов оказывает влияние на конечный результат. [1-10] Поэтому можно сузить задачу и разработать модель бурения под конкретную буровою установку. В ранее представленных работах было проведено исследование информационно-измерительной и управляющей системы и разработана система автоматического управления скоростью вращения и подачи долота бурового станка СБШ-250МН-32Т. [11-12]

В установке СБШ-250МН-32Т применен узел бурения, построенный по схеме, приведенной на рис. 1, где приняты следующие обозначения: ЭДП - электродвигатель постоянного тока; Р – редуктор вращателя с шинно-шлицевой муфтой на выходном валу; Б - собственно бур. Управление двигателем осуществляется по якорной обмотке Я сигналом управления U_D . На обмотку возбуждения ОВ подается постоянное напряжения.

На бур со стороны грунта действует осевая (продольная) сила сопротивления *R* и момент сопротивления ω_R . Бур вращается с угловой скоростью ω_B . Редуктор *P* имеет коэффициент передачи ι.

Угловая скорость ω_D вращения вала электродвигателя ЭД, управляющее напряжение U_D , подаваемое на его якорную обмотку, и момент μ_D полезной нагрузки, формируемый на входном валу, связаны следующим дифференциальным уравнением:

$$T_D\dot{\omega}_D(t)+\omega_D(t)=k_U U_D(t)-k_\mu\mu_D(t), \tag{1}$$

где T_D - постоянная времени разгонной характеристики электродвигателя (механическая постоянная времени); k_U - коэффициент передачи электродвигателя по управляющему напряжению $U_D(t)$; k_μ - коэффициент передачи по моменту.

Момент полезной нагрузки создается силами сопротивления внедрению бура в грунт и в первом приближении определяется следующей зависимостью:

$$\mu_B(t)=k_{\mu\omega}\omega_B(t)+k_{\mu R}R(t), \tag{2}$$

где $k_{\mu\omega}$ - коэффициент передачи по угловой скорости, определяющий скорость возрастания момента при возрастании угловой скорости вращения бура; ω_B - угловая скорость вращения бура; $k_{\mu R}$ - коэффициент передачи по осевой силе внедрения бура в грунт, определяющий скорость возрастания момента при возрастании силы *R*(*t*).

Подача бура увеличивается с возрастанием угловой скорости его вращения и с возрастанием осевой силы внедрения бура в грунт, и в первом приближении определяется по зависимости

$$\dot{y}_2(t)=k_{y\omega}\omega_B(t)+k_{yR}R(t), \tag{3}$$

где $k_{y\omega}$ - коэффициент передачи по угловой скорости, определяющий возрастание подачи при возрастании угловой скорости вращения бура; k_{yR} - коэффициент передачи по осевой силе внедрения бура в грунт, определяющий возрастание подачи при возрастании осевой силы *R*(*t*).

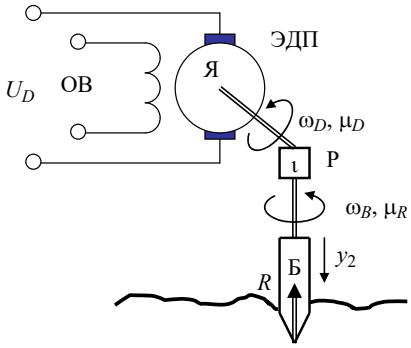


Рис. 1. Схема узла бурения с электродвигателем постоянного тока

Суммирование (2) и (3) дает

$$\mu_B(t)+k_{\mu y}\dot{y}_2(t)=\left(k_{\mu\omega}+k_{\mu y}k_{y\omega}\right)\omega_B(t)+\left(k_{\mu R}+k_{\mu y}k_{yR}\right)R(t) \tag{4}$$

Между полезным моментом на валу и полезным моментом на буре существует следующее соотношение:

$$\mu_B(t)=\iota\mu_D(t), \tag{5}$$

где ι коэффициент редукции.

Между угловой скоростью вала и угловой скоростью вращения бура существует следующее соотношение:

$$\omega_B(t)=\frac{\omega_D(t)}{\iota}, \tag{6}$$

Подстановка (5) и (6) в (4) дает:

$$\iota^2\mu_D(t)+\iota k_{\mu y}\dot{y}_2(t)=\left(k_{\mu\omega}+k_{\mu y}k_{y\omega}\right)\omega_D(t)+\iota\left(k_{\mu R}+k_{\mu y}k_{yR}\right)R(t). \tag{7}$$

Подстановка (7) в (1) дает

$$\widetilde{T}_D\dot{\omega}_D(t)+\omega_D(t)=\widetilde{k}_U U_D(t)+\widetilde{k}_y\dot{y}_2(t)+\widetilde{k}_R R(t), \tag{8}$$

где $\widetilde{T}_D$ - постоянная времени нагруженного привода; $\widetilde{k}_U$ - коэффициент передачи нагруженного привода по управляющему напряжению; $\widetilde{k}_y$ - коэффициент передачи нагруженного привода по подаче; $\widetilde{k}_R$ - коэффициент передачи нагруженного привода по сопротивлению грунта внедрению бура;

$$\widetilde{T}_D=\frac{T_D\cdot\iota^2}{k_\mu\left(k_{\mu\omega}+k_{\mu y}k_{y\omega}\right)+\iota^2};\ \widetilde{k}_U=\frac{k_U\cdot\iota^2}{k_\mu\left(k_{\mu\omega}+k_{\mu y}k_{y\omega}\right)+\iota^2};\ \widetilde{k}_y=\frac{k_\mu k_{\mu y}\cdot\iota}{k_\mu\left(k_{\mu\omega}+k_{\mu y}k_{y\omega}\right)+\iota^2};\ \widetilde{k}_R=\frac{k_\mu\left(k_{\mu R}+k_{\mu y}k_{yR}\right)\cdot\iota}{k_\mu\left(k_{\mu\omega}+k_{\mu y}k_{y\omega}\right)+\iota^2}.$$

Таким образом, построена общая аналитическая математическая модель бурения с учетом особенностей буровой машины СБШ-250МН-32Т, определены основные характеристики, влияющие на параметры машины при бурении.

Список литературы

1. Абубакиров В.Ф., Архангельский В.А., Буримов Ю.Г., Малкин И.Б. Буровое оборудование: справочник: в 2 т. Т. 1. М.: Недра, 2000.

2. Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование / под ред. А.М. Гусмана и К.П. Порожского. Екатеринбург: УГГА, 2002. 592 с.

3. Баграмов Р.А. Буровые машины и комплексы: учебник. М.: Недра, 1988. 501 с.

4. Денисов П.Г. Сооружение буровых: учебник. М.: Недра, 1989. 397с.

5. Ильский А.Л., Шмидт А.П. Буровые машины и механизмы: учеб ник. М.: Недра, 1989. 396 с.

6. Проталов В.Н., Султанов Б.З., Кривенков С.В. Эксплуатация оборудования для бурения скважин и нефтегазодобычи: учебник. М.: Недра, 2004.

7. Солод В.И. Горные машины и автоматизированные комплексы: учебник для вузов / В.И. Солод, В.И. Зайков, К.М. Первов. М.: Недра, 1981. 503 с.

8. Горные машины и комплексы: учебное пособие для курсового проектирования/ А.А. Хорешок, А.М. Цехин, Л.Е. Маметьев [и др.]. Горные машины и комплексы, 2026-08-10. Электрон. дан. (1 файл). Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачёва, 2018, 156 с.

9. Новоселов О.Н. Основы теории и расчета информационно–измерительных систем / О.Н. Новоселов, А.Ф. Фомин. М.: Машиностроение, 1991. 336 с.

10. Калашников В.И. Информационно–измерительная техника и технологии: учеб. для вузов / В.И. Калашников [и др.]; под ред. Г.Г. Раннева. М.: Высш. шк., 2002. 454 с.

11. Фам Т.Л. Разработка системы автоматического управления скоростью вращения и подачи долота бурового станка СБШ-250МН-32Т // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 5. С. 216-224.

12. Фам Т.Л. Исследование информационно-измерительной и управляющей системы проходческого комбайна // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 9. С. 46-52.

13. Федоров В.С. Проектирование режимов бурения. М.: Гостоптехиздат, 1958, 215 с.

Акименко Татьяна Алексеевна, канд. техн. наук, доцент, tantan72@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Фам Тхань Лием, аспирант, phamthanhliem1982@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MODEL OF THE DRILLING PROCESS OF THE SBSH-250MN-32T INSTALLATION

T.A. Akimenko, Pham Thanh Liem

A model of the drilling process for the SBSh-250MN-32T installation is proposed; a block diagram of the drilling unit is presented and analytical expressions are obtained taking into account the time constant of the loaded drive; transmission coefficient of the loaded drive by control voltage; transmission coefficient of the loaded drive by feed; transmission coefficient of the loaded drive based on soil resistance to drill penetration.

Key words: drilling model, payload torque, drilling unit, drill feed, angular velocity.

Akimenko Tatiana Alekceevna, candidate of technical sciences, docent, tantan72@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pham Thanh Liem, postgraduate, phamthanhliem1982@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.942
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-102-103

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ СВЯЗИ

А. С. Белов, М. М. Добрышин, А. А. Горшков, К. М. Большебратский

Наличие нескольких программных продуктов порождает новые ранее неизвестные сценарии реализации компьютерных атак. В статье представлена методика, позволяющая на основе учета и нового порядка обработки сведений об известных уязвимостей программного обеспечения и порядка их взаимодействия на одном средстве обработки, хранения или передачи информации выявить наличие не защищенных уязвимостей или потенциальные сценарии реализации компьютерных атак. Подобные знания позволят должностным лицам организующим мероприятия информационной безопасности повысить обоснованность принятия решений о использовании средств защиты и повысить уровень информационной безопасности корпоративной сети в целом.

Ключевые слова: уязвимость информационной безопасности, сценарии реализации компьютерной атаки, программное обеспечение.

Повышение производительности применяемых средств обработки, хранения и передачи информации (далее – объект защиты) позволяют расширить номенклатуру предоставляемых услуг связи за счет установки дополнительного программного обеспечения (ПО). Данный факт наряду с удобствами для пользователей приводит к появлению новых уязвимостей информационной безопасности (ИБ).

Статистические данные описывающие уязвимости и инциденты ИБ показывают, что количество уязвимостей двух и более программных продуктов не равно сумме уязвимостей каждого из продуктов. Появление новых уязвимостей обусловлено наличием потенциально возможных переходов между программами [1, 2].

Исходя из того, что существующие объекты защиты представляют сложное аппаратно-программные средства, схема взаимодействия программных продуктов не очевидна, но получение знаний о ней позволит уменьшить количество инцидентов ИБ, за счет обоснованного выбора применяемых средств защиты и необходимых настроек [3].

Основываясь на том, что регламентирующие документы в большинстве случаев предполагают, что нарушитель обладает требуемыми компетенциями, т.е. он способен выявить такую стратегию (траекторию) реализации КА, которая будет эксплуатировать уязвимости нескольких программных продуктов, что приведет к ущербу.

С целью устранения указанного недостатка разработана методика, представляющая последовательность действий позволяющую выделить структуру и взаимосвязь установленного на объекте защиты ПО, последовательности эксплуатации уязвимостей при реализации известных и потенциальных компьютерных атак (КА).

Цель методики – выявление функциональной взаимосвязи разнородного ПО установленного на объекте защиты, позволяющего выявить известные и потенциальные сценарии реализации КА.

В качестве источников исходных данных выступают базы данных об известных уязвимостях ПО (например, OVAL), известных сценариев и траекториях реализации КА (MITRE ATT&CK, CAPEC, ATT&CK, OWASP, STIX, WASC), техническая документация ПО.

Основные ограничения:

– выявление потенциальных сценариев реализации КА основывается на известных механизмах взаимодействия ПО и не учитывает не описанные производителями возможности по их взаимодействию;

– выявление потенциальных сценариев реализации КА основывается на известных уязвимостях применяемого ПО.

Выходной результат методики – графовое представление известных уязвимостей установленного на объекте защиты ПО.

Сущность методики заключается в выполнении следующей последовательности действий и поясняется рисунком 1.

В блоке 1 от доверенных информационных ресурсов получают новые или обновляют имеющиеся базы данных об известных (структурированных) уязвимостях информационной безопасности и стратегиях реализации КА.

В блоке 2 от доверенных информационных ресурсов получают, обрабатывают и преобразуют в структурированный вид неструктурированные сведения (текстовое описание) об известных уязвимостях ИБ и стратегиях реализации КА.

В блоке 3 формируют поисковые запросы об известном и установленном программном обеспечении (ПО), включая описание функционирования и эксплуатации применения ПО для [4, 5]:

– базового ПО (BIOS);

– системного ПО (операционная система (Windows, Unix, ОСРВ – операционные системы реального времени, Mac OS X) и ее компоненты (динамические библиотеки, драйверы, системные утилиты), операционные оболочки и файловые менеджеры);

– служебного ПО (диспетчеры файлов, средства сжатия данных, средства диагностики, программы инсталляции, средства коммуникации, средства просмотра и воспроизведения, средства компьютерной безопасности);

– ПО прикладного уровня (офисные пакеты, графические редакторы, системы управления базами данных, программы обработки данных, браузеры, интегрированные системы делопроизводства и бухгалтерского учета, интерпретаторы и компиляторы).

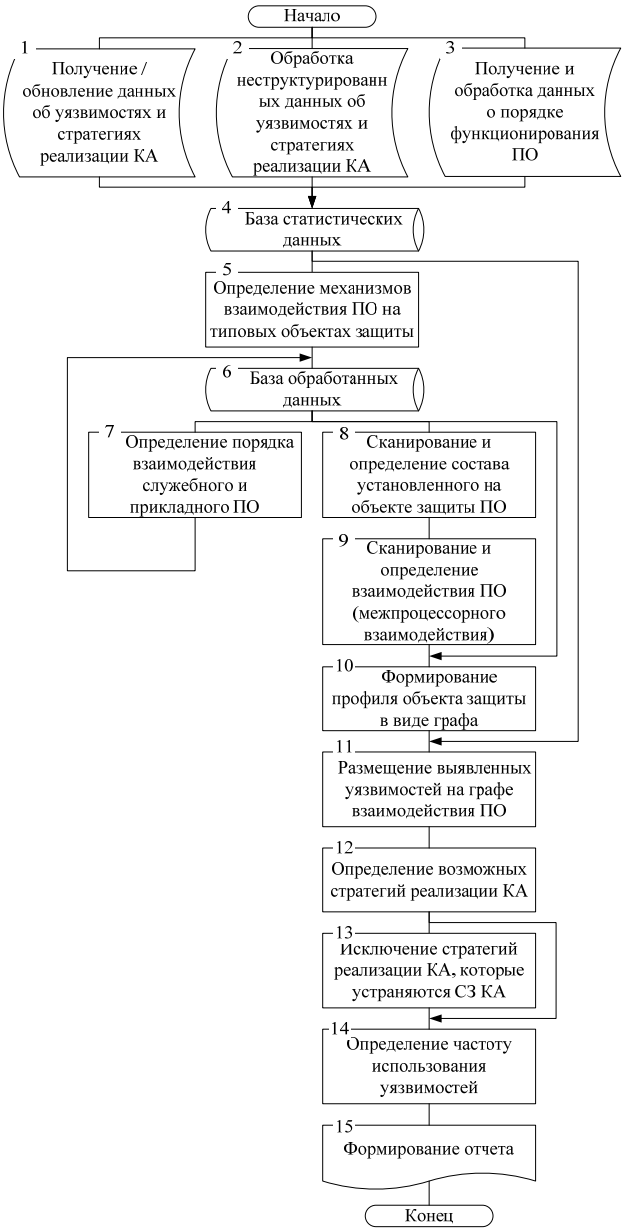


Рис. 1. Структурно-логическая последовательность реализации методики формирования поверхности защиты

Полученные данные обрабатывают и в формализованном виде сохраняют в базу статистических данных (блок 4).

В блоке 5 на основании анализа архитектуры построения объекта защиты (ЭВМ), BIOS и системного ПО определяют механизмы взаимодействия ПО на типовых объектах защиты [6]:

– междупрограммные интерфейсы;

– механизмы обмена сообщениями между ПО;

– механизмы синхронизации данных;

– механизмы разделения памяти;

– механизмы удаленных вызовов для синхронизации работы ПО.

Полученные данные обрабатывают и в формализованном виде сохраняют в базу обработанных данных (блок 6).

В блоке 7 на основании анализа описания функционирования и эксплуатации системного и служебного ПО, а также ПО прикладного уровня определяют порядок взаимодействия служебного и прикладного ПО, в том числе формирования, заполнения и использования [7]:

– баз данных;

– буфера обмена;

– разделяемых файлов;

– технологий DDE, OLE 1, OLE 2, и /или COM и DCOM;

– набора функций API;

– протоколов взаимодействия и универсальных структур XML и Json.

Полученные данные обрабатывают и в формализованном виде сохраняют в базу обработанных данных (блок 6).

В блоке 8 с помощью специализированных программ сканируют и определяют все установленное на исследуемом объекте защиты: базовое ПО; системное ПО (в том числе его компоненты); служебное ПО и прикладное ПО, версии ПО, версии обновлений ПО, патчей и т.д. В том числе установленного ПО реализующего функции защиты от КА, а также конфигурации настроек выявленного ПО [8].

В блоке 9 с помощью специализированных программ сканируют, определяют: протоколы взаимодействия ПО на объекте защиты; области совместного хранения ПО в долговременной памяти объекта защиты; порты (сокеты) взаимодействия ПО.

В блоке 10 на оснований результатов сканирования ПО в блоках 8, 9, а также определенного в блоках 5 и 7 порядка взаимодействия ПО установленного на объекте защиты, формируют профиль объекта защиты, представленного в виде графа, вершинами которого являются установленное ПО, ребрами являются связи между ПО (рис. 2) [9].

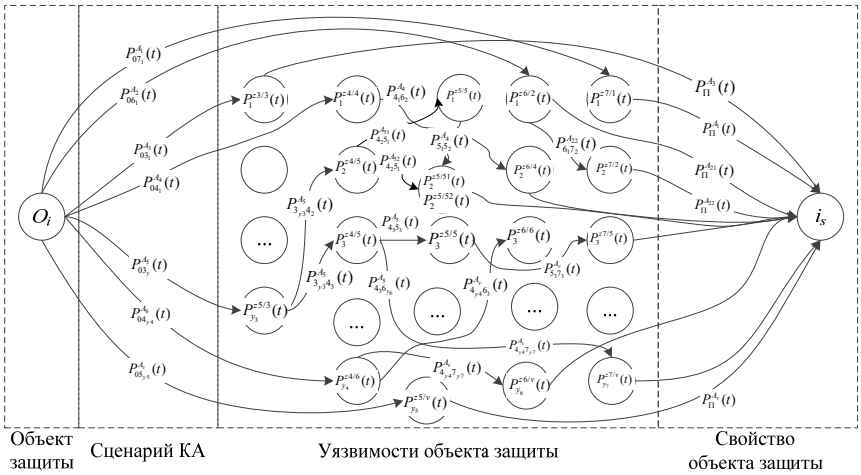


Рис. 2. Граф эксплуатации уязвимостей при реализации известных или потенциально возможных компьютерных атак

Если между двумя ПО существуют связи на уровне протоколов взаимодействия, общих мест хранения или использования общих портов, то указывают соответствующее количество ребер. Наличие изолированной вершины в графе означает, что ПО не взаимодействует ни с одним другим ПО установленном на объекте защиты.

В блоке 11 профиль объекта защиты дополняют известными уязвимостями (сохраненными в блоке 4) с учетом стратегий реализации компьютерных атак. Дополнение заключается в изменении вершин с указанием ПО, на вершины с указанием уязвимостей указанного ПО.

При наличии у одного ПО двух и более уязвимостей, количество вершин увеличивается соответственно количеству уязвимостей, ребра графа (связи) дублируются для каждой уязвимости.

В блоке 12 используя алгоритм «поиск в глубину» определяют все возможные маршруты реализации (стратегии) КА, т.е. маршруты перехода от выбранной вершины (уязвимости) до вершины отражающей достижения цели КА [10].

В блоке 13 на основании определенных в блоке 8 сведений об установленном ПО реализующем функции защиты от КА, а также конфигурации настроек выявленного ПО исключают из выявленных стратегии реализации КА которые потенциально устранены, т.е. хотя бы одна из вершин (уязвимость) входящих в маршрут реализации КА устранена или защищается соответствующим ПО.

В блоке 14 подсчитывают частоту использования каждой уязвимости ПО для полного перечня возможных стратегий реализации КА (блок 12) и стратегий реализации КА от которых не обеспечивается защиты (блок 13). Ранжируют уязвимости и разделяют их по заданному критерию на типовые группы (например «часто используемые», «умеренно используемые», «редко используемые»).

В блоке 15 в виде таблиц, виджетов и графиков отражают все возможные стратегии реализации КА, отдельно выделяются стратегии реализации КА от которых не обеспечивается защиты, указывают частоту использования каждой уязвимости ПО.

Разработанная методика позволяет представить процесс обеспечения информационной безопасности объекта защиты в виде графа, выявить стратегии реализации КА от которых нет защиты, определить наиболее часто используемые уязвимости для дальнейшего их устранения.

Применение методики выявить на 15-18 % больше потенциально реализуемых стратегий реализации КА, что подтверждает достижения цели разработки методики.

Представленную методику целесообразно применять на этапе формирования системы обеспечения информационной безопасности КСС, а также при установке на объект защиты нового или обновлении применяемого ПО.

Список литературы:

1. Особо горячие обстоятельства из мира кибербезопасности. Итоги 2022-го и прогнозы на 2023 год по версии Positive Technologies.

2.Добрышин М. М. Особенности применения информационно-технического оружия при ведении современных гибридных войн / I-methods. 2020. Т. 12. № 1. С. 1-11.

3.Белов А. С., Добрышин М. М., Шугуров Д. Е., Свечников Д. А. Предложение по контролю безопасности программного обеспечения при периодических обновлениях / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 2. С. 133-137.

4.Вдовикина Н. В., Машечкин И. В., Терехин А. Н., Томилин А. Н. Операционные системы: взаимодействие процессов: учебно-методическое пособие / Издательский отдел факультета ВМиК МГУ 2008, - 215 с.

5.Орлов, С. А. Технологии разработки программного обеспечения / С. А. Орлов, Б. Я. Цилькер. СПб. : Питер, 2012. 608 с.

6.Белик А. Г., Цыганенко В. Н. Проектирование и архитектура программных систем: учебное пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. 80 с.

7.Назаров С. В. Архитектуры и проектирование программных систем: монография /С.В. Назаров. М.: ИНФРА-М, 2013. 413 с.

8.Добрышин М.М., Белов А.С., Цибуля А.Н., и др. Программа оценки уровня защищенности элементов компьютерной системы в статическом режиме / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023611432, 19.01.2023. Заявка № 2022685457 от 21.12.2022.

9.Белов А.С., Добрышин М.М., Шугуров Д.Е., Большебратский К.М. Подход к оценке защищенности компьютерной сети связи на основе количества уязвимостей / Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 11. С. 20-25.

10. Белов А.С., Добрышин М.М., Шугуров Д.Е., и др. Программный модуль анализа защищенности элементов информационных систем / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022619328, 20.05.2022. Заявка № 2022618811 от 17.05.2022.

Белов Андрей Сергеевич, д-р техн. наук, доцент, andrej2442016@yandex.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Добрушин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, сотрудник, Dobrithin@ya.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Горшков Алексей Николаевич, канд. техн. наук, сотрудник, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Большебратский Кирилл Михайлович, сотрудник, kirillbolhov@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

THE METHOD OF FORMING THE PROTECTION SURFACE TO ASSESS SECURITY ELEMENTS OF THE CORPORATE COMMUNICATION NETWORK

A.S. Belov, M.M. Dobrynin, A.A. Gorshkov, K.M. Bolshebratsky

The presence of several software products generates new previously unknown scenarios for the implementation of computer attacks. The article presents a technique that allows, based on accounting and a new procedure for processing information about known software vulnerabilities and the order of their interaction on one means of processing, storing or transmitting information, to identify the presence of unprotected vulnerabilities or potential scenarios for the implementation of computer attacks. Such knowledge will allow officials organizing information security events to increase the validity of decisions on the use of security tools and to increase the level of information security of the corporate network as a whole.

Key words: information security vulnerability, computer attack scenarios, software.

Belov Andrey Sergeevich, doctor of technical sciences, docent, andrej2442016@yandex.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Dobryshin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, employee, Dobrithin@ya.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Gorshkov Alexey Nikolaevich, candidate of technical sciences, employee, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Bolshebratsky Kirill Mikhailovich, employee, kirillbolhov@mail.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation

УДК 004.85
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-106-107

ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ ЭЛЕКТОРАЛЬНЫХ НАСТРОЕНИЙ И ФОРМИРОВАНИЮ СОЦИАЛЬНОГО ПОРТРЕТА КАНДИДАТА В ХОДЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ КАМПАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ

А.А. Воробьев, А.Ю. Андросов, Д.К. Черный, Д.А. Беляев

Предложен подход к мониторингу электоральных настроений и формированию социального портрета кандидата в ходе избирательной кампании на основе машинного обучения с использованием данных, полученных из открытых источников, обеспечивающий повышение достоверности и полноты требуемой информации.

Ключевые слова: социальный портрет, электоральное настроение, социальная сеть, датасет, нейронные сети, машинное обучение.

Известно, что на всех этапах избирательной кампании сотрудниками избирательной комиссии реализуется деятельность по подготовке и проведению выборов различного уровня. Для этого используется ряд информационных систем, обеспечивающих сбор, обработку и анализ информации, полученной из различных источников (закрытых и открытых) для поддержки решения множества задач, в том числе связанных с мониторингом электоральных настроений и формированием социального портрета кандидатов [6, 14].

Так при мониторинге электоральных настроений [1] выявляется отношение граждан к политическим процессам, выборам и кандидатам, включая их предпочтения, уровень доверия, ожидания и намерения относительно голосования на выборах различных уровней - от местных до федеральных. Это позволяет оценить уровень политической активности, гражданской ответственности и участия населения в формировании органов власти и принятии важных для государства решений.

На сегодняшний день мониторинг электоральных настроений осуществляется в основном с помощью социологических опросов населения в виде интервью или телефонных опросов. Анкета такого опроса, чаще всего содержит вопрос: "Скажите пожалуйста, какой политической партии (кандидату) Вы симпатизируете?". После проведения опроса, ответы респондентов подсчитываются в процентном соотношении и составляется рейтинг кандидатов, который отражает электоральные предпочтения населения в каждом субъекте РФ или в целом по стране. Однако, учитывая, то что вопросы по выборной тематике относят к сенситивным, т.е. возможен большой процент неопределившихся респондентов, то и выводы, полученные на таких выборках с пропусками, становятся менее достоверными. Для повышения достоверности в работе предлагается использовать дополнительный источник информации - социальные сети. В последние годы из-за наличия большого количества пользователей и уровня их вовлеченности, социальные сети стали более эффективным инструментом для охвата различных слоев населения, которые ранее не были доступны при проведении социологических опросов [2]. Кроме того, современные методы обработки естественного языка позволяют извлекать из публикаций социальных сетей социально значимую информацию, которая лежит в основе предлагаемого авторами подхода.

В настоящее время анализ публикаций из открытых источников сети Интернет часто реализуется специалистами исходя из лингвистического подхода, заключающимся в определении тональности текста, то есть его эмоциональной окраски, на основе анализа частот встречаемости слов из заранее составленных словарей [3].

Кроме лингвистического подхода на практике к оценке тональности текста часто применяют следующие методы: машинное обучение с учителем, без учителя и статистические методы. Так, метод обучения с учителем использует данные с публикациями, которые содержат предопределенные тональности независимо от их предметной области. При обучении с учителем применяются нейронные сети, которые вносят существенные улучшения в обработку естественного языка, и что приводит к более точной оценки тональности. Статистические методы применяются при подсчете количества слов в тексте, определении средней длины предложения, изучения корреляции между определенными словами и реакциями пользователей. Краткий сравнительный анализ вышеперечисленных методов к оценке тональности представлен в таблице [4].

Сравнение методов оценки тональности показало, что наиболее подходящим среди них для решения сформулированной ранее проблемы является метод, основанный на машинном обучении с учителем, так как по большинству рассматриваемых признаков он превосходит другие [5].

На первоначальном этапе предлагаемого подхода к мониторингу электоральных настроений необходимо отобрать публикации социальных сетей по интересующим тематикам. Для этого сформированы ряд ключевых слов для поиска: "фамилия и инициалы кандидата", "выборы", "предвыборная кампания", "избиратели", "голосование", "ход выборов", "политические партии", "явка избирателей".

На следующем этапе осуществляется обработка полученных данных при помощи выбранного ранее метода машинного обучения с учителем.

После обработки публикаций социальных сетей получается набор текстов с выявленными тональностями. Для того чтобы интерпретировать полученные данные предлагается использовать индекс, который будет отражать изменение направленности общественного мнения по теме электоральных настроений.

Таблица 1

Сравнение методов оценки тональности

Признаки \ Методы	Статистические методы	Машинное обучение с учителем	Машинное обучение без учителя
Точность	–	+	–
Возможность обработки естественного языка	+	+	–
Оперативность	–	+	+
Простота	+	–	–

Индекс строится, но основе учета положительных (публикации с положительной тональностью) и негативных (публикации с негативной тональностью) упоминаний о кандидате в социальных медиа за определенный промежуток времени:

$$Z = \frac{\sum \text{все положительные упоминания} - \sum \text{все негативные упоминания}}{\sum \text{все упоминания о кандидате}} \quad (1)$$

Индекс Z изменяет свою величину от -1 (при условии, что все упоминания о кандидате негативные) до +1 (при условии, что все упоминания о кандидате положительные) [4]

Для примера приводится вычисление индекса (выражения 2-4) направленности мнения по данным представленным в таблице 2.

Таблица 2

Мнение избирателей, выраженное в сообщениях социальных сетей

Кандидат, за которого намерены голосовать	Количество положительных упоминаний в социальных медиа	Количество негативных упоминаний в социальных медиа	Количество нейтральных упоминаний
Кандидат А	1452	752	401
Кандидат Б	895	302	148
Кандидат В	365	405	207

$$Z_1 = \frac{1452-752}{1452+752+401} = 0{,}27; \quad (2)$$

$$Z_2 = \frac{895-302}{895+302+148} = 0{,}44; \quad (3)$$

$$Z_3 = \frac{365-405}{365+405+207} = -0{,}04\,. \quad (4)$$

В первом и втором случае присутствует значительная положительная, а в третьем незначительная отрицательная направленность электоральных настроений населения. Исходя из полученных результатов можно составить рейтинг кандидатов, который будет наглядно отражать направленность электоральных предпочтений населения на момент проведения исследования.

Для сравнения подходов к мониторингу избирательной кампании на основе анализа результатов социологических опросов и на основе составления индекса при помощи анализа социальных сетей использовались данные, полученные в ходе избирательной кампании губернатора Рязанской области в 2022 году. Результат сравнения представлен в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение подходов к мониторингу электоральных настроений

Рейтинг составленный перед выборами на основе анализа результатов социологического опроса	Рейтинг составленный перед выборами на основе расчета индекса	Результаты выборов
Павел Малков (Единая Россия) – **82,4 %**	Павел Малков (Единая Россия) – **0,74**	Павел Малков (Единая Россия) – **85,55 %**
Дмитрий Репников (КПРФ) – **6,6 %**	Денис Сидоров (КПРФ) – **0,17**	Денис Сидоров (КПРФ) – **5,68 %**
Денис Сидоров (КПРФ) – **4,7 %**	Дмитрий Репников (КПРФ) – **0,14**	Дмитрий Репников (КПРФ) – **3,6 %**
Наталья Рубина – **3,3 %**	Наталья Рубина – **0,1**	Наталья Рубина – **2,7 %**
Григорий Парсентьев – **3 %**	Григорий Парсентьев – **0,08**	Григорий Парсентьев – **2,22 %**

Анализ результатов сравнительного анализа показал, что использование подхода, рассчитываемого индекс направленности общественного мнения, основанного на методе машинного обучения с учителем и применяемого к сообщениям социальных сетей, позволил получить более корректный отранжированный список кандидатов по сравнению со списком, полученным классическим подходом и основанном на социологических опросах.

Одной из актуальных задач, также решаемых избирательной комиссией является формирование социального портрета кандидата, содержащего информацию о возрасте, поле, образовании, социальном статусе, интересах, политических предпочтениях и особенно об уровне дохода [7], где последняя информация подлежит обязательной проверке по ее достоверности [13] и таким образом позволит в том числе противодействовать коррупции [9]. Известно, что коррупция в настоящее время рассматривается как одно из самых больших препятствий для социально-экономического и общественно-политического развития России и за последние годы количество исследований её причин и способов борьбы с ней постоянно растет.

Для борьбы с коррупцией используются разные способы и одним из них является составление социального портрета для отбора кандидатов на выборах различного уровня на основе анализа сообщений в социальных сетях. Для решения этой задачи, как ранее было сказано используется государственная информационная система «Посейдон», однако информация, используемая в ее работе, в основном строится на закрытых источниках. В работе предлагается использовать в качестве открытого источника информации – социальные сети и подход по автоматизации процессов сбора, обработки и анализа создаваемых в них сообщений.

Так на предварительном этапе при составлении социального портрета кандидата предлагается выполнить сбор текстовой информации, связанной с интересующим кандидатом из социальных сетей и сформировать датасет документов в виде предварительно структурированного массива данных. В таком массиве у каждого объекта имеются конкретные свойства: признаки, связи между объектами или определённое место в выборке данных [8].

На следующем этапе выполняется предобработка датасета. Основная цель предобработки датасета - получить чистый, структурированный и готовый к использованию набор данных, который можно использовать для анализа или обучения моделей машинного обучения. Без предобработки датасета данные могут содержать ошибки, пропуски, дубликаты, выбросы и другие проблемы, которые могут существенно повлиять на результаты анализа или обучения моделей [10].

В дальнейшем на основе предварительно обработанных текстовых сообщений определяется оценка важности слова в документе относительно датасета. Для выполнения этого шага применяется метод TF-IDF, позволяющей эффективно выделять нужные признаки в текстовых данных и обеспечить качественную классификацию сообщений [11].

После применения метода TF-IDF в работе выбран и используется метод опорных векторов (SVM), который является более эффективным для классификации текстов с большим количеством признаков по сравнению с другими решениями [12]. Для успешного выполнения этого этапа требуется заранее определить классы сообщений, по которым будет производиться классификация. В таблице 4 представлены рассматриваемые в работе классы коррупционной деятельности.

Таблица 4

Классы коррупционной деятельности

Название полей	Результат
Кандидаты	Кандидат №_
Классы коррупционной деятельности	
Демонстрация стиля жизни не соответствующего доходу.	-
Дарение подарков и оказание неслужебных услуг кандидатом/-у.	-
Быстрый рост дохода.	-
Покупка имущества, не соответствующего доходу.	-
У кандидата №_ обнаружены N признаков коррупционной деятельности	-

После определения классов классификации происходит обучение SVM модели путем предоставления матрицы признаков и соответствующих меток классов на вход классификатора.

Для подтверждения возможности формирования социального портрета кандидата с использованием сообщений в социальных сетях был выполнен эксперимент, включающий поиск признаков коррупционной деятельности для действующего губернатора одного из регионов РФ, который показал следующие результаты, представленные в таблице 5.

Таблица 5

Социальный портрет кандидата

Название полей	Результат
Кандидаты	Кандидат №1
Классы коррупционной деятельности	
Демонстрация стиля жизни не соответствующего доходу.	Не обнаружено
Дарение подарков и оказание неслужебных услуг кандидатом/-у.	Обнаружено
Быстрый рост дохода.	Не обнаружено
Покупка имущества, не соответствующего доходу.	Обнаружено
У кандидата №1 обнаружено два признака коррупционной деятельности.	Присутствуют признаки коррупционной деятельности: - Дарение подарков и оказание неслужебных услуг кандидатом/-у: - Подарен кандидату автомобиль премиум класса от компании «N»; - Покупка имущества, не соответствующего доходу: - Покупка квартиры в элитном жилом комплексе «N» в городе Москва

Таким образом предложенный подход к мониторингу электоральных настроений и формированию социального портрета на основе анализа сообщений в социальных сетях позволил повысить достоверность и полноту информации о кандидатах и результатах мониторинга электоральных настроений в ходе избирательной кампании.

Список литературы

1. Горшков М.К., Шереги Ф.Э. Прикладная социология: методология и методы. Институт социологии РАН, 2011. 372 с.

2. Klašnja M., Barberá P., Beauchamp N., Nagler J., and Tucer A. Measuring Public Opinion with Social Media Data. Oxford Handbooks Online, 2017. 32 p.
3. Воробьев А.А. Методика сбора и обработки социологической информации из сети интернет // А.А. Воробьев, А.М. Рыбак, Р.А. Середкин, А.Ю. Андросов, Б. И. Соловьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 2. С. 208-213.
4. Kim D., Chung C.J., Eom K. Measuring Online Public Opinion for Decision Making: Application of Deep Learning on Political Context. Sustainability 2022. 14 p.
5. Ногин В. Линейная свертка в многокритериальной оптимизации, 2014. 10 с.
6. Исмелов Н. Государственная автоматизированная система «Выборы» как средство автоматизации избирательного процесса, 2016. 3 с.
7. Социальный портрет человека: определение и особенности [Электронный ресурс] URL: https://alfacasting.ru/faq/socialnyi-portret-celoveka-opredelenie-i-osobennosti (дата обращения 09.08.2023).
8. Для чего аналитику данных датасет и где его взять [Электронный ресурс] URL: https://practicum.yandex.ru/blog/dataset-dlya-mashinnogo-obucheniya-i-analiza (дата обращения: 15.08.2022).
9. Федеральный закон от 25.12.2008 N 273-ФЗ (ред. от 10.07.2023) "О противодействии коррупции". М., 2023.
10. ML Предварительная обработка данных на Python [Электронный ресурс] URL: https://www.geeksforgeeks.org/data-preprocessing-machine-learning-python (дата обращения 10.06.2023).
11. Извлечение признаков из текстовых данных с использованием TF-IDF [Электронный ресурс] URL: https://habr.com/ru/companies/otus/articles/755772 (дата обращения: 15.08.2023).
12. SVM. Подробный разбор метода опорных векторов, реализация на python [Электронный ресурс] URL: https://habr.com/ru/companies/ods/articles/484148 (дата обращения: 15.08.2023).
13. Указ Президента РФ от 06.06.2013 N 546 (ред. от 26.06.2023) "О проверке достоверности сведений об имуществе и обязательствах имущественного характера за пределами территории Российской Федерации…". М., 2023.
14. «Посейдон» выловит коррупционеров [Электронный ресурс] URL: https://www.kommersant.ru/doc/5329955 (дата обращения: 15.08.2023).

Воробьев Андрей Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, сотрудник, awa@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Андросов Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, сотрудник, saper176@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Беляев Даниил Александрович, сотрудник, belyaev-dan2015@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Черный Данил Константинович, сотрудник, danickch@yandex.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

AN APPROACH TO MONITORING ELECTORAL SENTIMENTS AND FORMING A SOCIAL PORTRAIT OF A CANDIDATE DURING AN ELECTION CAMPAIGN USING DATA FROM OPEN SOURCES

A.A. Vorobyev, D.K. Cherny, D.A. Belyaev

An approach to monitoring electoral sentiments and forming a social portrait of a candidate during an election campaign based on machine learning using data obtained from open sources is proposed, which provides an increase in the reliability and completeness of the required information.
Key words: social portrait, electoral mood, social network, dataset, neural networks, machine learning.

Vorobyev Andrey Anatolyevich, candidate of technical sciences, docent, employee, awa@mail.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Androsov Aleksei Yurevich, candidate of technical sciences, researcher, saper176@mail.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Belyaev Daniil Alexandrovich, employee, belyaev-dan2015@mail.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Cherny Danil Konstantinovich, employee, danickch@yandex.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation

УДК 004.942
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-110-111

МЕТОДИКА СОКРАЩЕНИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ АТАК НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

М. М. Добрышин, Д. Е. Шугуров, К. М. Слесарева, Д. А. Юркин

В статье описан принцип формирования и реализации действий по сокращению количества контролируемых параметров, за счет применения генетического алгоритма. В частности определен порядок действий по заданию хромосом и генов, определен порядок мутации генов, а также сформулированы некоторые условия принятия решений. Также в статье представлен пример реализации сформулированного алгоритма.

Ключевые слова: система обнаружения атак, сигнатура, параметр, генетический алгоритм, мутация.

В ответ на совершенствование средств и способов защиты от компьютерных атак, злоумышленники для достижения своих деструктивных целей стремятся совершенствовать применяемые и разрабатывают новые виды компьютерных атак (КА). Одним из направлений работы по противодействию данному процессу в настоящее время является расширение признакового пространства характеризующего КА. Наряду со многими достоинствами данного подхода существуют и ряд существенных недостатков.

Так увеличение признакового пространства требует увеличение вычислительных ресурсов выделяемых для средств обнаружения атак (СОА), в противном случае либо снижается эффективность СОА, либо СОА затрудняет работу фрагмента сети связи. Для сетей с низкой скоростью передачи данных этот факт не значителен, а для сетей, в которых циркулирует большой объем данных на высоких скоростях указанный факт способен проявляться. Под признаковым пространством понимается множество параметров, характеризующих каждую КА. Визуально данное пространство возможно представить в виде таблицы или матрицы.

Увеличение признакового пространства, безусловно, повышает достоверность классификации КА, однако с практической точки зрения данный факт не столь актуален. Для конечного количества средств защиты от компьютерных атак (СЗ КА) используемых в сетях связи (согласно [1], все СЗ КА объединены в 16 классов), фактически не принципиально в отношении какого из подвидов КА они применяются.

Также увеличение признакового пространства потенциально способно увеличить время идентификации КА (рис. 1), т.е. необходимо совпадение всех элементов сигнатуры. С точки зрения процессов расследования инцидента информационной безопасности и оценки эффективности СЗ КА, достоверное определение вида КА достаточно актуально (рис. 2). Однако при противодействии ряду видов КА (например, для различных DDoS-атак) время принятия решения на активацию и применение СЗ КА имеет существенное значение.

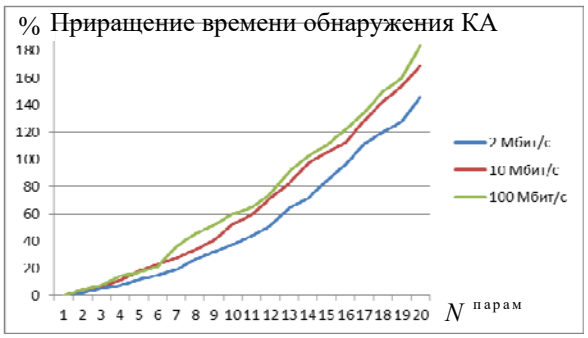


Рис. 1. Приращение времени обнаружения КА для различного количества контролируемых параметров

Рис. 2. Приращение достоверности обнаружения КА для различного количества контролируемых параметров

Таким образом, возникает противоречие между требованиями, предъявляемыми к достоверности классификации КА СОА и эффективностью СЗ КА.

Исследования, проводимые в данной области [2-4], показали, что существуют корреляционные связи между отдельными параметрами, характеризующими КА, что потенциально позволяет сократить количество контролируемых параметров путем поэтапного попарного сравнения и исключения параметров, имеющих сильные корреляционные связи. Такой подход требует значительных вычислительных и временных ресурсов, причем выявление новых видов КА будет требовать повторного сравнения с увеличением временных ресурсов.

Для устранения противоречия между СОА и СЗ КА предлагается сократить количество обрабатываемых параметров, т.е. СОА продолжит собирать статистические данные об изменении всех контролируемых параметрах (это позволит повысить достоверность расследования инцидентов ИБ), а принимать решение о выявлении признаков начала КА и применении конкретных СЗ КА будет по сокращенному перечню. С целью устранения выявленного противоречия предлагается применить методику на основе генетического алгоритма использующего мутацию и наследование генов [5-7].

В ***блоке 1*** вводят исходные данные о признаковом пространстве – набор сигнатур с указанием контролируемых параметров.

Набор исходных данных преобразуют в набор генов.

В качестве одной хромосомы выступает логическая «1» если значение параметра отлично от нуля или логический «0» если рассматриваемый параметр не используется при выявлении признаков КА.

$$H := \begin{cases} X_j^i \vee X_{j+d}^{i+k} = 1,\ i,k \in N^{\text{атак}}, j,d \in N^{\text{парам}} \rightarrow X = 1 \\ X_j^i \vee X_j^{i+k} = 0, \rightarrow X = 0 \end{cases}$$

Данные могут быть представлены в виде таблицы или матрицы:

вид атаки / хромосома	параметр / ген									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1		1	1		1		1	1	1
2					1					
3	1	1	1	1				1	1	1
4							1		1	
5	1			1		1				
6		1						1		
7	1	1			1				1	
8	1				1			1		
9	1	1						1		
10	1					1				

В качестве генов первого поколения выступает упорядоченные множества логических значений каждого параметра, используемого для идентификации КА:

В ***блоке 2*** задают правила наследования (перемешивания) и (или) мутации генов [8].

Для решения рассматриваемой задачи предлагается пошаговое логическое сложение первого с одним из последующих по порядку генов первого поколения.

Например, ген № 1 поочередно «логически» складывается с генами №2, № 3, …, № 10.

Лучший ген последующих поколений также поочередно складывается с генами первого поколения не вошедших в предыдущий набор генов.

Для рассматриваемого примера, логическое суммирование генов 1 и 2 примет следующий вид:

вид атаки / хромосома	параметр / ген	
	1	**2**
1	1	
2		
3	1	1
4		
5	1	
6		1
7	1	1
8	1	
9	1	1
10	1	

→

вид атаки / хромосома	параметр / ген
	1,2
1	1
2	
3	1
4	
5	1
6	**1**
7	1
8	1
9	1
10	1

В ***блоке 3*** с целью снижения вычислительных затрат и сокращения количества итераций поиска, определяют частоту использования контролируемых параметров для идентификации КА и ранжируют их.

В ***блоке 4*** с учетом размерности признакового пространства определяют правила принятия решения и выбора [9].

Выживает ген, в состав которого входит наибольшее количество не пустых хромосом – обладающий наибольшей суммой логических «1».

При равной сумме не пустых хромосом, выживает ген с наименьшим порядковым номером.

Поиск решения заканчивается при достижении логической суммы не пустых хромосом гена равной количеству видов КА.

В ***блоке 5*** формируют первое поколение и приступают к поиску решения.

Для рассматриваемого примера (рис. 3), мутация гена № 1, в первом поколении примет следующий вид:

хромосома	ген								
	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	0	1	0	1	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	0	0	0	0	0	1	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1
логическая сумма	**8**	7	7	8	7	8	8	8	7

Мутация гена № 1, во втором поколении примет следующий вид:

хромосома	ген							
	1,2,3	1,2,4	1,2,5	1,2,6	1,2,7	1,2,8	1,2,9	1,2,10
1	1	1	1	1	1	1	1	1

2	0	0	1	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	1	0	1	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1
логическая сумма	8	8	**9**	8	9	8	9	8

Мутация гена № 1, в третьем поколении примет следующий вид:

хромосома	ген				
	1,2,5,6	1,2,5,7	1,2,5,8	1,2,5,9	1,2,5,10
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	0	1	0	1	0
5	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1
логическая сумма	9	**10**	9	10	9

Результаты работы алгоритма, показывают, что за три итерации, с использованием, простых логических операций, решена задача по нахождению рационального количества контролируемых параметров характеризующих КА, а именно для идентификации факта реализации КА достаточно контролировать 4 из 10 параметров.

Следует отметить, что набор параметров, полученный с применением генетического алгоритма не является оптимальным, возможно нахождение набора параметров имеющих еще меньшую размерность или время обработки выявленных параметров будет ниже, чем у полученного, однако такие решения потребуют большую вычислительную сложность по сравнению с представленным алгоритмом [10].

Используя программную реализацию (Python) указанного алгоритма для анализа применяемых сигнатур СОА MaksPatrol, выигрыш от сокращения количества контролируемых параметров можно представить на рисунке 4.

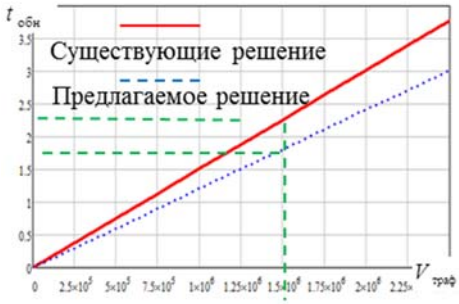


Рис. 4. Сравнение времени обнаружения DDoS-атаки

Таким образом, разработанная методика обеспечивает достижение поставленной цели, а именно сокращения перечня контролируемых параметров характеризующих КА, при обеспечении требуемой достоверности обнаружения КА.

Элементы разработанной методики реализованы в виде программы для ЭВМ, которую возможно использовать должностным лицам, организующим информационную безопасность сети связи.

Список литературы

1. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Приказ от 22 сентября 2020 г. № 486 Об утверждении классификатора программ для электронных вычислительных машин и баз данных. М., 2020.

2. Гречишников Е.В., Зубачев А.Б., Сазыкин А.М., Добрышин М.М., Берлизев А.В. Предложения по повышению быстродействия распределенной системы мониторинга компьютерных сетей, интегрированных в единую сеть электросвязи / Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 3-4 (105-106). С. 24-29.

3. Стародубцев Ю.И., Бухарин В.В. Обнаружение анализа сетевого трафика информационно-вычислительной сети // Защита информации. Инсайд. 2012. № 4(46). С. 72–74.

4. Бегаев А. Н., Добрышин М. М., Закалкин П. В., Реформат А. Н., Рауткин Ю. В. Комплексный алгоритм мониторинга защищенности узлов vpn от компьютерной разведки и DDoS-атак / Электросвязь. 2018. № 7. С. 46-52.

5. Рассел, Стюарт, Норвиг, Питер. Искусственный интеллект: современный подход, 4-е изд., том 1. Решение проблем: знания и рассуждения. СПб. : ООО "Диалектика", 2021. 704 с.
6. Бураков М.В. Генетический алгоритм: теория и практика: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2008. 64 с.
7. Батищев Д.И., Неймарк Е.А., Старостин Н.В. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные технологии и компьютерное моделирование в прикладной математике». Нижний Новгород, 2007, 85 с.
8. Рассел Стюарт Норвиг, Питер. Искусственный интеллект: современный подход, 4-е изд., том 2. Знания и рассуждения в условиях неопределенности. СПб.: ООО "Диалектика", 2021. 480 с.
9. Рассел Стюарт Норвиг, Питер. Искусственный интеллект: современный подход, 4-е издание, 2022. Том 3. Обучение, восприятие и действие. СПб.: ООО "Диалектика", 2022. 640 с.
10. Гречишников Е.В., Зубачев А.Б., Сазыкин А.М., Добрышин М.М., Берлизев А.В. Предложения по повышению быстродействия распределенной системы мониторинга компьютерных сетей, интегрированных в единую сеть электросвязи / Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 3-4 (105-106). С. 24-29.

Добрушин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, сотрудник, Dobrithin@ya.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Шугуров Дмитрий Евгеньевич, канд. техн. наук, сотрудник, sde33@academ.msk.rsnet.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Слесарева Ксения Максимовна, сотрудник, kirillbolhov@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Юркин Даниил Андреевич, сотрудник, Россия, Москва, Московский физико-технический институт

A TECHNIQUE FOR REDUCING THE FEATURE SPACE OF ATTACK DETECTION SYSTEMS BASED ON THE USE OF A GENETIC ALGORITHM

M.M. Dobryshin, D.E. Shugurov, K.M. Slesareva, D.A. Yurkin

The article describes the principle of formation and implementation of actions to reduce the number of controlled parameters through the use of a genetic algorithm. In particular, the procedure for specifying chromosomes and genes is defined, the order of gene mutation is determined, and some decision-making conditions are formulated. The article also presents an example of the implementation of the formulated algorithm.
Key words: attack detection system, signature, parameter, genetic algorithm, mutation.

Dobryshin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, employee, Dobrithin@ya.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Shugurov Dmitry Evgenievich, candidate of technical sciences, employee sde33@academ.msk.rsnet.ru, Russia, Oryol, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Slesareva Ksenia Maximovna employee, kirillbolhov@mail.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Yurkin Daniil Andreevich, employee, Russia, Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology

УДК 004.932
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-113-114

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.И. Ефимов, Е.Р. Муратов, М.Б. Никифоров

В данной статье рассмотрено применение разработанного программного стенда для исследования и разработки алгоритмов обработки изображений различных спектральных диапазонов. Приведен пример исследования алгоритмов совмещения изображений.
Ключевые слова: Архитектура программного стенда, конвейер. ТВ, ТПВ, лидар, DLL.

Современные алгоритмы обработки данных от систем технического зрения – это конвейеры, состоящие из последовательности более мелких (простых) алгоритмов [1].

С одной стороны, имеется множество алгоритмов обработки данных, предоставляемых различными средами разработки (например, Matlab, OpenCV), переписывание программного кода которых с целью исследования и проектирования новых алгоритмов нецелесообразно. С другой стороны, их возможностей не всегда достаточно для создания новых алгоритмов, к тому же формат входных данных в разных пакетах обработки изображений в большинстве случаев различен [2-6]. Также следует отметить, что пакеты обработки изображений и библиотеки дополняют друг друга, но, как правило, не предусматривают между собой полноценного взаимодействия.

При разработке элементов программно-математического обеспечения систем технического зрения возникает потребность в создании системы, которая объединила бы известные библиотеки, увязала обработку разных форматов данных, позволила создавать конвейер алгоритмов и произвести оценку параметров и качества его функционирования. Процесс перевода алгоритмов на бортовое оборудование, например, в ПЛИС сопряжен с поэтапной отладкой всего конвейера, совместно с оборудованием. Такая возможность может быть обеспечена с помощью предлагаемой системы автоматизированной отладки и исследования алгоритмов и программ.

1. Принципы организации автоматизированной системы отладки и исследования алгоритмов и программ. Система автоматизированной отладки и исследования алгоритмов и ПО представляет собой универсальное программное средство - программный стенд, позволяющее проводить отработку и сравнительный анализ алгоритмов обработки изображений, включая алгоритмы совмещения изображений различной физической природы и оценку качества получаемых совмещений в автоматическом режиме.

Архитектура программного стенда и его программная реализация не накладывают каких-либо ограничений на типы изображений, используемых в качестве входных в пользовательских функциях. В качестве них могут быть изображения, полученные от телевизионных (ТВ), тепловизионных (ТПВ), радиолокационных, а также лидарных сенсоров [9, 10].

Для работы с ранее не используемым алгоритмом добавляется новый блок (добавление происходит автоматически по данным конфигурационного файла). Для изменения конфигурационного файла можно воспользоваться интерфейсом стенда или изменить его вручную. Интерфейс стенда позволяет выбирать функцию из библиотеки DLL, реализующую интересующий алгоритм, а также описать параметры этой функции и задать ее размещение в палитре функциональных блоков. Архитектура программного стенда представлена на рисунке 1.

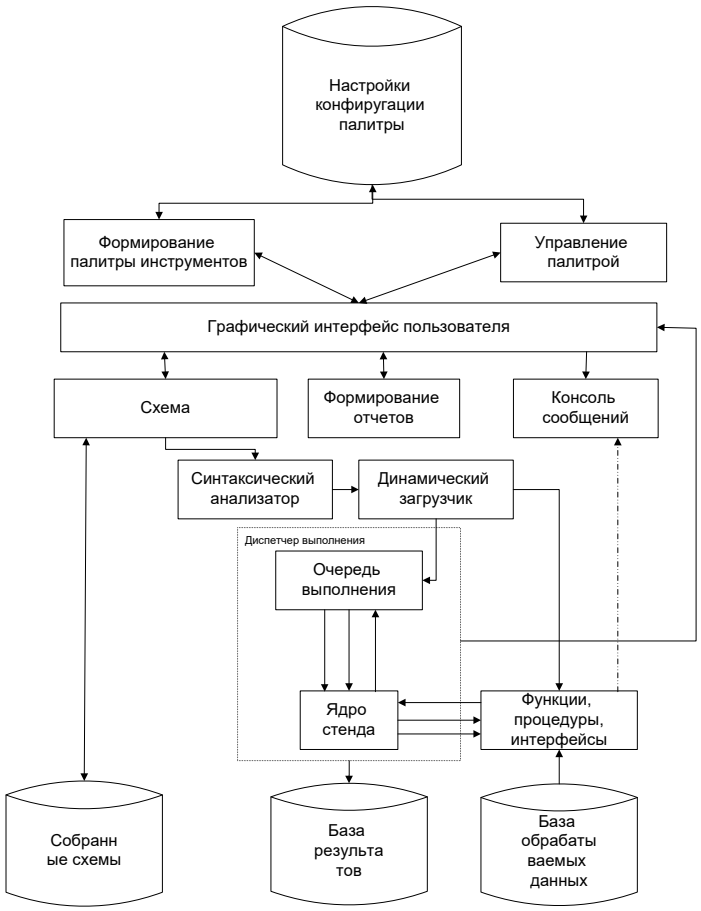


Рис. 1. Архитектура программного стенда

2. Критерии оценки алгоритмов совмещения изображений

Для оценки эффективности алгоритмов совмещения изображений введены показатели качества алгоритмов:

показатель качества совмещения *Q*, используемый для оценки качества выполненного совмещения разнородных изображений [11];

трудоемкость алгоритма совмещения изображений *T*. Будет использоваться абсолютная величина трудоемкости (машинное время), либо относительная, например, для алгоритмов корреляционного совмещения изображений – количество вызовов ЦФ $N_{ЦФ}$.

Таким образом, в качестве показателей эффективности *QM* для алгоритмов совмещения изображений целесообразно принять пару показателей *QM = (T, Q)*.

Каждому тестируемому *i*-му методу в координатах *(T, Q)* соответствует уравнение вида:

$$F_i(T,Q) \mid \gamma_i = 0, \tag{1}$$

где γ_i является параметром *i*-го метода, изменение которого позволяет перераспределить соотношения между показателями *Q* и *T*. Параметр может быть один, например, при методе двухэтапного сканирования, это шаг сканирования, а у генетического алгоритма два параметра – размер популяции и количество поколений. Для каждого алгоритма совмещения необходимо в первую очередь определиться с наиболее эффективным значением параметра метода γ_i.

Решение уравнения (1) для различных γ_i называется *качественной характеристикой алгоритма* (КХА). Если при выбранном значении *T* качественная характеристика одного алгоритма лежит выше качественной характеристики другого алгоритма, то первый алгоритм обеспечивает лучшее качество совмещения *Q* при тех же затратах на поиск. Если при выбранном значении *Q* качественная характеристика одного алгоритма лежит левее качественной характеристики другого алгоритма, то первый алгоритм требует меньших затрат для достижения того же показателя качества совмещения.

Для оценки показателя качества совмещения используются статистические характеристики коэффициента совмещения *K*, который определяется для каждой пары кадров совмещаемых изображений.

Коэффициент совмещения *K* изменяется в диапазоне от *0* до *1*. *K=1* – идеальное совмещение, *K=0* – полное несовмещение.

Кроме этого, на интегральный показатель качества совмещения также влияет вероятность правильного совмещения изображений *P*.

Для каждой серии экспериментов коэффициент совмещения *K* вычисляется для каждой пары кадров совмещаемых изображений, а по всей тестовой видеопоследовательности (сюжету) оцениваются: математическое ожидание M_K, дисперсия D_K и среднеквадратическое отклонение (СКО) σ_K. Если коэффициент совмещения *K(t)* рассматривать как случайный процесс, то даже при предположении о его стационарности, при строгом подходе к вычислению этих характеристик они должны вычисляться по совокупности различных реализаций случайного процесса *K(t)*.

Алгоритм тем лучше, чем меньше σ_K, и чем больше M_K. Показатель качества совмещения *Q* можно определить как: $Q = \alpha_M M_K + \alpha_\sigma \dfrac{1}{\sigma_K}$, где α_M, α_σ – весовые коэффициенты соответственно математического ожидания и СКО, причем $\alpha_M + \alpha_\sigma = 1$. Значения α_M, α_σ определяются экспериментально, в зависимости от важности того или другого параметра. Чем больше значение показателя качества совмещения *Q*, тем лучше алгоритм.

Для объединения влияния M_K, σ_K может быть использован мультипликативный подход для определения показатель качества совмещения *Q*. В этом случае

$$Q = \frac{M_k}{\sqrt{3}\sigma_k} - 1.$$

В данном варианте показатель качества совмещения *Q* может принимать и отрицательные и положительные значения, причем значение *Q = 0* соответствует равновероятному закону распределения *K* между 0 и 1. В этом случае $M_K = 0{,}5,$ и $\sigma_K = \dfrac{1}{2\sqrt{3}}$. Значение *Q* = 0 можно считать пограничным между неопределенностью процесса совмещения при Q < 0 и определенной степени доверия к результатам совмещения при Q > 0.

Еще может быть использован гиперболический вариант вычисления показателя качества совмещения:

$$Q = \frac{1}{4\sqrt{3}\sigma_k (1 - M_k)}.$$

Данный показатель равен 1 при $M_K = 0{,}5,$ и равновероятном законе распределения. Соответственно, он меньше единицы при больших значений СКО и меньших значения математического ожидания. При $M_K = 1$ и $\sigma_K = 0$ стремится к ∞.

Нормированная автокорреляционная функция

$$\rho_k(\tau) = M\left[\left(K(t) - M_K\right)\left(K(t+\tau) - M_K\right)\right] / \sigma_K^2,$$

где *M[Y]* – математическое ожидание случайной величины *Y*. Если тестовый сюжет имеет длительность t_{max} и измерения *K(t)* проводились с интервалом Δt, то

$$M\left[\left(K(t) - M_K\right)\left(K(t+\tau) - M_K\right)\right] = \frac{\Delta t}{t_{\max} - \tau} \sum_{t=0,\Delta t}^{t_{\max}-\tau} \left(K(t) - M_K\right)\left(K(t+\tau) - M_K\right) = \frac{\Delta t}{t_{\max} - \tau} \sum_{t=0,\Delta t}^{t_{\max}-\tau} K(t)K(t+\tau) - M_K^2,$$

$$\rho_K(\tau) = \frac{t_{\max} \sum_{t=0,\Delta t}^{t_{\max}-\tau} K(t)K(t+\tau) - M_K^2}{\left(t_{\max} - \tau\right) \sum_{t=0,\Delta t}^{t_{\max}} K^2(t) - M_K^2}.$$

При этом для мультипликативного варианта показатель качества совмещения

$$Q = \frac{M_k}{\sqrt{3}\sigma_k \left(1 - \dfrac{1}{\tau_n} \int_0^{\tau_n} \rho_K(\tau) d\tau\right)} - 1,$$

где τ_n = 3..5 с – граничное значение интервала контроля автокорреляционной связи коэффициента совмещения K(t).

Для гиперболического варианта

$$Q = \frac{1}{4\sqrt{3}\sigma_k\left(1 - M_k)(1 - \frac{1}{\tau_n}\int\limits_0^{\tau_n}\rho_k(\tau)d\tau\right)}.$$

В результате будет лучшим тот алгоритм совмещения изображений, для которого интегральный коэффициент совмещения изображений будет максимальным, а трудоемкость вычислений при этом окажется минимальной или приемлемой.

Кроме этого, для определения показателя качества совмещения *Q*, а также эффективности метода оценки качества совмещения, следует учитывать степень изменения математического ожидания M_K и СКО σ_K до и после применения соответствующего алгоритма совмещения. Например, $Q' = \frac{M_k\sigma_k^0}{\sigma_k M_k^0}$, где M_k^0 и σ_k^0 это математическое ожидания и СКО совмещения видеопоследовательности двух изображений до их совмещения с помощью исследуемого алгоритма. Так при $Q' \le 1$ алгоритм совмещения или методика оценки качества совмещения абсолютно не эффективны.

Общее число проведения элементарных опытов (совмещение пар кадров) $n = 1200 \div 10000$ является обоснованным и достаточным для оценки вероятности по частоте с доверительной вероятностью $\beta = 0{,}9$, при достижении частоты событий порядка 0,95 ÷ 0,98.

Таким образом, качественные характеристики позволяют сравнивать различные алгоритмы совмещения изображения.

3. Оценка качества совмещения изображений. Важно количественно оценить степень (качество) совмещения изображений для принятия решения о возможности использования результатов совмещения изображений. Применение автоматических алгоритмов оценки качества совмещения позволяет избежать необходимости экспертных оценок качества совмещения изображений и объективно определять показатели качества функционирования алгоритмов совмещения, благодаря чему становится возможным сравнение различных алгоритмов совмещения между собой [11].

Необходимо четко и однозначно сформулировать задачу оценки качества совмещения изображений в системах комбинированного видения, а также требования, предъявляемые к данной оценке.

Исходные данные:

- изображение *A={(x, y, I_1(x,y))}*, полученное от одного из сенсоров, установленных на борту летательного аппарата;
- изображение *B={(x, y, I_2(x,y))}*, полученное от сенсора на борту летательного аппарата, либо путём проецирования виртуальной модели местности в двухмерное растровое изображение.

Предварительные действия:

- предварительная обработка изображений *A* и *B*, необходимая для дальнейшего совмещения;
- совмещение исходных изображений с применением некоторой функции совмещения *f*.

Задача оценки качества совмещения состоит в получении количественной оценки *K(A, B, f)* точности совмещения изображений *A* и *B* с применением функции *f*.

В процессе проектирования алгоритмов оценки качества совмещения необходимо, чтобы результирующая оценка *K* удовлетворяла ряду условий:

1. $K \in [0, 1]$, то есть оценка *K* – нормированное в пределах от нуля до единицы действительное число.
2. Оценка *K* должна быть непрерывна и определена на всей области определения *A, B, f*, т.е. вычисление оценки *K* возможно для любых входных изображений и любой функции их совмещения.
3. $K \to 1$ при увеличении точности совмещения *A* и *B*. Оценка *K* должна быть тем больше, чем больше совпадают *f(A,B)* и изображение *A* или *B* в зависимости от того, как осуществляется совмещение функцией *f*.
4. Временная сложность расчета оценки *K* должна быть по возможности минимальной, чтобы данная оценка могла быть применима в составе алгоритмов совмещения изображений.

Вывод. В результате можно сделать вывод, что оценки качества совмещения следует осуществлять на базе алгоритмов, основанных на анализе форм объектов. Этот подход заложен в архитектуру предлагаемой системы автоматизированной отладки и исследования алгоритмов и ПО.

Экспериментальные исследования алгоритмов совмещения изображений [8, 9, 10] подтвердили работоспособность предлагаемой системы и пригодность ее для автоматизации научных исследований в области разработки алгоритмов обработки изображений. В процессе исследования программный стенд автоматически формирует необходимые показатели качества алгоритмов и выводит их на экран.

Список литературы

1. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения. Под. ред. Костяшкина Л.Н. и Никифорова М.Б./М.: ФИЗМАТЛИТ. 2018. 235 с.

2. Беляков П.В., Никифоров М.Б. Вариационный метод вычисления оптического потока в системе-на-кристалле // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 76-82.

3. Tarasov A., Muratov Y., Nikiforov M., Baranchikov A. Intelligent video computer tracking system // В сборнике: 13th International Conference ELEKTRO 2020, ELEKTRO 2020 - Proceedings. 13. 2020. С. 9130254.

4. Anders Hast, Johan Nysjö, and Andrea Marchetti, “Optimal RANSAC – Towards a Repeatable Algorithm for Finding the Optimal Set,” in Journal of WSCG, Vol. 21, no. 1. P. 21-30, 2013.

5. Peter Kovesi, MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing [Электронный ресурс] URL: http://www.peterkovesi.com/matlabfns (дата обращения: 10.05.2023).

6. Калинин Н.В., Черпалкин А.В., Никифоров М.Б. Применение ПЛИС для ускорения обработки изображения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 5. С. 67-73.

7. Нгуен К.Х. Определение параметров движения объектов в пассивной сканирующей системе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2023. №1. Выпуск 67. С. 19-23. DOI: 10.21667/1995-4565-2019-67-1-19-23.

8. Nikiforov M., Muratov Y., Loskutov A., Melnik O. Video Computer Technology for Assessing Heart Rate Based on Spectral Analysis // 2021 23rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications, DSPA 2021. 23. 2021.

9. Kudinov I.A., Nikiforov M.B., Kholopov I.S. Comparative Analysis of Two Strategies for Forming Regions of Interest in Panorama Vision System//В сборнике: Proceedings of ITNT 2021 - 7th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology. 7. 2021.

10. Кудинов И.А., Никифоров М.Б., Холопов И.С. Стратегии формирования панорамного видеоизображения без учёта информации о сюжетных соответствиях в мультиспектральных системах с распределённой апертурой // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 4. С. 589-599.

11. Кудинов И.А., Никифоров М.Б., Холопов И.С. Алгоритм двухэтапной калибровки камер с малыми угловыми размерами пересечения полей зрения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 74. С. 99-107.

12. Шакирзянов Р. М., Шлеймович М. П. Модель и метод для обнаружения цветных объектов с использованием модифицированного преобразования радиальной симметрии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. №1. Выпуск 77. С. 101-112.

13. Ефимов А.И. Алгоритмы оценки качества совмещения изображений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 2. С. 92-98.

Ефимов Алексей Игоревич, канд. техн. наук, доцент, lexie62rus@mail.ru, Россия, Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,

Муратов Евгений Рашитович, канд. техн. наук, доцент, myratov_er@mail.ru, Россия, Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,

Никифоров Михаил Борисович, канд. техн. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой, директор НОЦ «СпецЭВМ», nikiforov.m.b@mail.ru, Россия, Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина

AUTOMATED SYSTEM FOR STUDYING IMAGE PROCESSING ALGORITHMS

M.B. Nikiforov

This article discusses the use of the developed software stand for research and development of image processing algorithms for various spectral ranges. An example of the study of image alignment algorithms is given.

Key words: Software bench architecture, conveyor. TV, TPV, lidar, DLL.

Efimov Aleksey Igorevich, candidate of technical sciences, docent, lexie62rus@mail.ru, Russia, Ryazan, Ryazan State Radiotechnical University named after V.F. Utkin,

Muratov Evgeny Rashitovich, candidate of technical sciences, docent, myratov_er@mail.ru, Russia, Ryazan, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,

Nikiforov Mikhail Borisovich, candidate of technical sciences, associate professor, deputy head of the department, director of the research center «Special Computer», nikiforov.m.b@mail.ru, Russia, Ryazan, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin

УДК 629.083
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-118-119

ОЦЕНКА ГОТОВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В.А. Любимов, С.Н. Лазарев

В статье рассматриваются предложения по оценке готовности эксплуатации беспилотных авиационных систем (БАС), с учётом особенностей организационных и технических требований по применению беспилотных воздушных судов, конструктивного построения, принятой системы интегрированной логистической поддержки. Оценка готовности БАС проводится на всех этапах эксплуатации: подготовка к применению, использование по назначению, ремонт, плановое, неплановое техническое обслуживание. При оценке готовности БАС, кроме технологических мероприятий учитывается организационный аспект, который не позволяет в ряде случаев применять БАС, что снижает уровень ее готовности.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, готовность техническая, готовность организационная, готовность подготовки к применению, готовность планируемого применения, интегрированная логистическая поддержка.

В настоящее время происходит стремительный рост развития и применения в многих сферах коммерческой деятельности (энергетика, нефтегазовый сектор, капитальное строительство, сельское хозяйство, геофизические исследования и др.) беспилотных авиационных систем (БАС). Это связано с тем, что используемое воздушное пространство позволяет получить новые аэрологистические свойства, расширить показатели дистанционного мониторинга, контроля за стихийными бедствиями, измерения загрязнения атмосферы, наблюдения за дорожным движением, разведки местности, объектов инфраструктуры (особенно труднодоступных) и др.

Особенную роль БАС играют в военном деле, где они эффективно используются как элементы системы боевого охранения, пограничного и морского патрулирования, разведки, наведения и целеуказания, огневого воздействия и др. В связи с этим Правительство РФ приняло стратегию развития отечественных беспилотных авиационных систем до 2030-2035 гг., что предполагает высокие темпы развития данной отрасли, потребности которой оцениваются в сотни миллиардов рублей.

Эффективное применение БАС по назначению во многом определяется ее готовностью выполнять заданные функции при нахождении в работоспособном состоянии. По определению готовность рассматривается, как свойство объекта, заключающееся в его способности находиться в состоянии, в котором он может выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонта в предположении, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены [1]. Это свойство оценивает способность перехода БАС из произвольно заданного состояния в состояние непосредственного использования по назначению и поддержание его в этом состоянии.

БАС по своему технологическому содержанию являются сложными, многофункциональными техническими системами. В тоже время, в состав БАС входит беспилотное воздушное судно (БВС), к которому предъявляются высокие требования по обеспечению безопасности полетов и поддержанию летной годности. Полеты БВС должны быть такими же безопасными, как и полеты воздушных судов с пилотом на борту. Они не должны представлять опасность для людей или имущества на земле или в воздухе в ходе их использования по назначению. То есть БВС должны выполнять полеты в соответствии с установленными правилами регулирования полетов воздушных судов. Вместе с тем, БАС имеют некоторые отличия от сложных технических объектов, связанных с особенностями допуска их к эксплуатации (полетам) [2].

Такими особенностями являются:

1) воздушное судно, станция внешнего пилота должны иметь сертификат летной годности;

2) эксплуататнту БАС оформляется сертификат, дающий разрешение выполнять полеты БВС в соответствии с эксплуатационными требованиями;

3) внешние пилоты и другие члены внешнего экипажа должны пройти подготовку и иметь соответствующие свидетельства;

4) на БАС оформляется и ведется бортовой журнал;

5) на бортовую радиостанцию, при ее наличии в комплекте поставки, оформляется разрешение;

6) на перевозимый груз оформляется декларация и страхуется ответственность;

7) оформляется план полета, который представляется в органы организации воздушного движения;

8) эксплуатантом разрабатываются Руководство по производству полетов и Руководство по регулированию технического обслуживания, с отметками о проведенном очередном техническом обслуживании.

Очевидно, что данный перечень включает организационные мероприятия, выполнение которых, наряду с технологическими, определяют летную годность: готовность к эксплуатации БАС. Следует отметить, что данный перечень условий не является исчерпывающим. Он может быть изменен, дополнен или сокращен в зависимости от обновлений, изменений нормативных и законодательных документов. Важно отметить, что с точки зрения готовности к использованию БАС должны быть выполнены все организационные требования. Невыполнение хотя бы одного пункта требований не позволяют эксплуатанту использовать БАС по назначению.

Таким образом, готовность эксплуатации БАС можно оценить коэффициентом готовности $K_{\text{ГЭ}}$, который напрямую зависит от коэффициента готовности организационного $K_{\text{О}}$ и коэффициента технической готовности $K_{\text{ТГ}}$. С учетом независимости рассматриваемых событий (организационных и технологических) коэффициент готовности эксплуатации БАС будет определяться по выражению:

$$K_{\text{ГЭ}} = K_{\text{О}} \cdot K_{\text{ТГ}}. \quad (1)$$

Как было отмечено выше, коэффициент готовности организационный $K_{\text{о}}$ определяется рядом (конечным множеством) условий: $M\{y_1, y_2, \ldots y_8\}$. При этом, если все условия y_i выполнены, то есть $\forall y_i \in M$, то $K_{\text{о}}$ принимает значение равное 1 ($K_{\text{о}} = 1$) в противном случае, то есть $\exists y_i \in M$, то $K_{\text{о}}$ принимает значение равное 0 ($K_{\text{о}} = 0$). В общем виде $K_{\text{о}}$ примет выражение:

$$K_{\text{о}} = \begin{cases} 1, \forall y_i \in M \\ 0, \exists y_i \in M \end{cases}. \tag{2}$$

Техническая готовность БАС характеризует его способность находиться в требуемом (работоспособном) состоянии в заданный или произвольный момент времени функционирования. Таким образом, оценивается способность перехода БАС из любого заданного состояния в состояние применения по назначению и поддержание его в этом состоянии.

Для оценки технической готовности используются ряд комплексных показателей. В качестве основного показателя, характеризующего техническую готовность БАС выбран коэффициент технической готовности ($K_{\text{тг}}$). По определению коэффициент технической готовности – это вероятность того, что в произвольный момент времени технический объект не будет находиться на плановом техническом обслуживании (ремонте) и начало его применения по назначению не будет задержано сверх допустимого времени или отменено из-за отказа [3]. Исходя из определения выражение для расчета $K_{\text{тг}}$ будет иметь вид:

$$K_{\text{тг}} = K_{\text{пп}} \cdot K_{\text{гп}}, \tag{3}$$

где $K_{\text{пп}}$ – коэффициент планируемого применения; $K_{\text{гп}}$ – коэффициент готовности к применению.

Как видно из выражения (3), значение $K_{\text{тг}}$ будет зависеть от готовности планируемого применения и готовности к применению [4].

Коэффициент планируемого применения ($K_{\text{пп}}$) показывает, какую часть заданного периода эксплуатации БАС не будет находиться на плановом техническом обслуживании (ремонте). Данный показатель определяется по выражению:

$$K_{\text{пп}} = 1 - (K_{\text{п}} \cdot \tau) \tag{4}$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент применения; τ – интенсивность эксплуатации за анализируемый период, определяемая отношением наработки применения по назначению $T_{\text{пн}}$ к периоду эксплуатации $T_{\text{э}}$.

Исходя из физического смысла, коэффициент применения $K_{\text{п}}$ рассчитывается, как сумма удельной суммарной продолжительности плановых видов технического обслуживания и удельной суммарной продолжительности восстановления:

$$K_{\text{п}} = K_{\text{пто}} + K_{\text{пв}}, \tag{5}$$

где $K_{\text{пто}}$ – удельная суммарная продолжительность технического обслуживания; $K_{\text{пв}}$ – удельная суммарная продолжительность восстановления.

Удельные временные затраты на техническое обслуживание и восстановление являются показателями системы интегрированной логистической поддержки (ИЛП) БАС. Показатели удельных временных затрат показывают какую долю времени затрачивается на техническое обслуживание $T_{\text{то}}$ и восстановление $T_{\text{в}}$ БАС за рассматриваемый период эксплуатации $T_{\text{э}}$ и определяются по выражениям:

$$K_{\text{пто}} = \frac{T_{\text{то}}}{T_{\text{э}}}, \tag{6}$$

$$K_{\text{пв}} = \frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{э}}}. \tag{7}$$

В выражении (3), необходимо определить второй показатель: коэффициент готовности к применению $K_{\text{гп}}$. Данный показатель показывает вероятность того, что для определенного временного интервала, использование БАС по назначению не будет задержано сверх допустимого времени, или отменено из-за отказа. Выражение для расчета данного показателя имеет следующий вид:

$$K_{\text{гп}} = K_{\text{г}} + (1 - K_{\text{г}}) \cdot P_{\text{в}}, \tag{8}$$

где $P_{\text{в}}$ – вероятность восстановления БАС; $K_{\text{г}}$ – коэффициент готовности.

Вероятность восстановления $P_{\text{в}}$ определяется по выражению:

$$P_{\text{в}} = 1 - e^{-t_{\text{п}} / t_{\text{в}}}, \tag{9}$$

где $t_{\text{п}}$ – время на подготовку БАС к применению ($t_{\text{п}} = t_{\text{пп}} + \Delta t_{\text{пп}}$); $t_{\text{пп}}$ – время развертывания и подготовки БАС к применению по нормативу, час; $\Delta t_{\text{пп}}$ – время задержки к применению по назначению, час. При этом $\Delta t_{\text{пп}} = 0$, если задержка не допустима; $t_{\text{в}}$ – время восстановления БАС, час.

В ходе эксплуатации могут возникать дополнительные простои, связанные с организацией мероприятий по восстановлению: задержкой поставок запасных частей, отсутствием финансовых средств на закупку услуг по восстановлению, процедурами закупки составных частей, оборудования БАС и др. Эти временные потери могут

быть оценены дополнительным коэффициентом $K_{\text{доп}}$, отражающим данные издержки [4].

Тогда выражение (1) по оценке эксплуатационной готовности может быть уточнено с учетом издержек работы системы ИЛП БАС:

$$K_{\text{гэ}} = K_{\text{о}} \cdot K_{\text{тг}} \cdot K_{\text{доп}}. \quad (10)$$

Таким образом, рассмотренное представление об эксплуатационной готовности БАС позволяет, провести комплексную оценку, включающую в себя организационную готовность, техническую готовность и издержки системы ИЛП, которые могут возникнуть на оцениваемом временном этапе эксплуатации. Учитывая особенности эксплуатации БАС, связанные с допуском БВС к полетам, кроме технической готовности, при оценке введен и учитывается коэффициент готовности организационный. В нормативных и законодательных актах определен минимально необходимый перечень мероприятий, документов, которые должны иметь эксплуатанты БАС. Невыполнение условий (требований) по организации эксплуатации БАС не позволяет осуществлять полеты. Для достижения требуемой готовности эксплуатации должностные лица организации эксплуатанта БАС должны строго следить и выполнять кроме технических требований, также и организационные требования по обеспечению готовности эксплуатации. В представленном материале оценка готовности эксплуатации БАС учитывает издержки системы ИЛП путем введения дополнительного коэффициента.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 63 с.

2. Циркуляр 328 ИКАО. Беспилотные авиационные системы (БАС). Монреаль, Канада : ИКАО, 2011.

3. ГОСТ Р 56111-2014 Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения. Номенклатура показателей эксплуатационно-технических характеристик. М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.

4. Любимов В.А. Комплексная оценка готовности сложного технического объекта // Известия Тульского государственного университета, 2021. Вып. 9. С. 137-140.

Любимов Владимир Алексеевич, канд. воен. наук, доцент, сотрудник, lubimov@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Лазарев Сергей Николаевич, доцент, сотрудник, serg.orel@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

COMPLEX ESTIMATION OF READINESS OF DIFFICULT TECHNICAL OBJECT

V.A. Lyubimov, S.N. Lazarev

The article discusses proposals for assessing the readiness of the operation of unmanned aircraft systems (UAS), taking into account the specifics of organizational and technical requirements for the use of unmanned aircraft, constructive construction, the adopted integrated logistics support system. Assessment of the readiness of the UAS is carried out at all stages of operation: preparation for use, intended use, repair, scheduled, unplanned maintenance. When assessing the readiness of the UAS, in addition to technological measures, the organizational aspect is taken into account, which does not allow in some cases to change the UAS, which reduces the level of its readiness. Keywords: unmanned aircraft systems, technical readiness, organizational readiness, readiness of preparation for use, readiness of planned use, integrated logistics support. The article discusses proposals for assessing the readiness of the operation of unmanned aircraft systems (UAS), taking into account the specifics of organizational and technical requirements for the use of unmanned aircraft, constructive construction, the adopted integrated logistics support system. Assessment of the readiness of the UAS is carried out at all stages of operation: preparation for use, intended use, repair, scheduled, unplanned maintenance. When assessing the readiness of the UAS, in addition to technological measures, the organizational aspect is taken into account, which does not allow in some cases to change the UAS, which reduces the level of its readiness.

Key words: unmanned aircraft systems, technical readiness, organizational readiness, readiness of preparation for use, readiness of planned use, integrated logistics support.

Lyubimov Vladimir Alekseevich, candidate of military sciences, docent, employee, lubimov@mail.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Lazarev Sergey Nikolaevich, docent, employee, serg.orel@mail.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation

УДК 621.311
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-121-122

АЛГОРИТМ ВЫБОРА МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Р.Н. Хамитов, Г.А. Хмара, В.Р. Махмутова

В статье рассмотрено совместное применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и накопителей энергии для системы электроснабжения нефтегазодобывающих месторождений. Разработан алгоритм выбора места размещения системы накопителей энергии (СНЭ) для нефтегазодобывающих месторождений с целью уменьшения неблагоприятных воздействий на параметры качества электроэнергии из-за колебаний мощности. Установлено, что при определении места размещения СНЭ наибольшее воздействие можно получить при выравнивании графика нагрузки в узле, где больше величина изменения дисперсии в энергосистеме. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет определить оптимальное место размещения СНЭ с целью повышения эффективности регулирования электропотребления и параметров качества электроэнергии при использовании ветроэнергетических установок. С помощью алгоритма предоставляется возможность оценки изменения графика нагрузки в узле и его влияния на энергосистему нефтегазодобывающих месторождений.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, накопители энергии, дисперсия, коэффициент взаимной корреляции, параметры графиков нагрузки, параметры качества электроэнергии.

Самым большим недостатком ветроэнергетики является отсутствие точной предсказуемой ее генерации. Колебания мощности крупной ветроэлектростанции приводит к многочисленным проблемам интеграции. Скорость ветра колеблется в нескольких временных масштабах из-за движения воздушных масс и многочисленных метеорологических явлений, что влияет на согласованность генерируемой энергии и вызывает проблемы с параметрами качества электроэнергии, когда энергия ветра интегрируется в энергетические системы [1,2].

Неопределенность в мощности крупной ветроэлектростанции может быть преодолена за счет использования быстродействующих диспетчерских источников. Задача работы – выяснить, как накопители энергии могут уменьшить неблагоприятные эффекты на параметры качества электроэнергии из-за колебаний мощности.

В условиях режима накопления мощности накопитель заряжается избыточной электроэнергией в основном при пропуске «непиковой» нагрузки, что позволяет избежать остановки генерирующего оборудования. При работе в буферном режиме накопитель работает параллельно с другим источником электроэнергии. В условиях разрядного режима накопитель отдает накопленную мощность потребителю. В случае аварийной ситуации накопитель позволяет гасить колебания мощности, так как современные накопители электроэнергии имеют высокую скорость вывода мощности в сеть и мобильность, которая отличается временем реверса мощности, необходимого для перевода его из режима накопления в режим вывода, и из режима выводы в режим накопления [3].

Место размещения и мощность накопителя являются важным вопросом при компенсации непостоянства ветра в сети. В основном интеграция ветровой энергии может влиять на некоторые параметры качества электроэнергии, такие как: мерцание, частоту, гармоники, прерывания и величину напряжения. Тогда основная функция накопителя будет заключаться в том, чтобы сглаживать пики мощности ветра и, таким образом, избегать превышения напряжения в сети [4].

Преимущества использования накопителей энергии во многом зависят от топологии и мощности сети, а также от количества ветроэнергетических установок (ВЭУ) интегрированных в сеть [5].

Применение систем накопления электроэнергии позволяет регулировать колебания мощности и напряжения, смещать пики нагрузки и повышать параметры качества электрической энергии. При размещении СНЭ в узлах нагрузки возможно поддержать необходимый уровень напряжения и регулировать его во время переходных процессов. С помощью СНЭ можно избежать отключения потребителей, снизить вероятность возникновения лавины напряжения и уменьшить перетоки реактивной мощности по линиям электропередачи. Накопители энергии могут согласовывать графики генерации и нагрузки, обеспечивая полную загрузку электростанции в соответствии с фактическим значением силы ветра, и решать проблему управления энергосистемой при большой доле ветровой генерации [6].

В связи с отсутствием единой методики расчета параметров СНЭ и возможностью ошибочного выбора места размещения, что может привести к экономической неэффективности и снижению энергоэффективности всей системы электроснабжения нефтегазодобывающих месторождений, требуется разработка алгоритма выбора места размещения СНЭ [7].

На рисунке 1 представлен алгоритм выбора места размещения СНЭ для нефтедобывающих месторождений.

Для начала выбирается участок энергосистемы, где необходимо снизить потери и для данного участка вводятся суточные графики с определенным интервалом времени. На выбранном участке энергосистемы для узлов по формулам 1-6 вычисляются параметры графиков нагрузки [8,9]:

- средняя мощность:

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_i}{n}, \quad (1)$$

где p_i - значение активной мощности за выбранный период, n – число периодов.

- среднеквадратичная нагрузка:

$$P_{ck} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} p_i^2}{n}}, \quad (2)$$

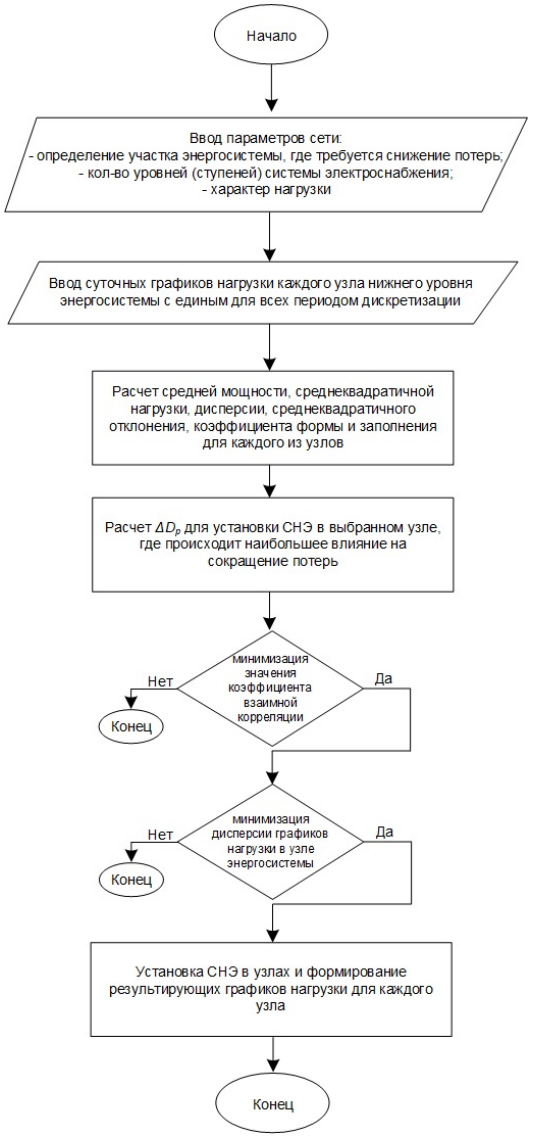


Рис. 1. Алгоритм выбора места размещения СНЭ для нефтегазодобывающих месторождений

- дисперсия:

$$D_p = p_{ck}^2 - p_c^2, \tag{3}$$

- среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma p = \sqrt{Dp}, \tag{4}$$

- коэффициент формы:

$$K_\phi = \frac{p_{ск}}{p_c} = \sqrt{n}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} p_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{n} p_i\right)^2}}, \tag{5}$$

- коэффициент заполнения:

$$K_з = \frac{p_c}{p_{\max}}, \tag{6}$$

Место размещения СНЭ выбирается с учетом минимального значения дисперсии в выбранных узлах и энергосистеме. По формуле 7 возможно уменьшить D_p за счет уменьшения дисперсии графиков нагрузки узлов и коэффициента взаимной корреляции.

$$kp_{rs} = \left[\frac{1}{t_ц}\left(\int_0^{t_ц-\tau} p_r(t)\,p_s(t+\tau)\,dt + \int_{t_ц-\tau}^{t_ц} p_r(t)\,p_s(t-t_ц+\tau)\,dt\right)\right] - p_{rc}p_{sc}, \tag{7}$$

где $p_r(t)$, $p_s(t)$ - графики нагрузки узлов, p_{rc}, p_{sc} - среднее значение мощности узлов, $t_ц$ - время повторения.

По формулам 8 определяют узлы, наиболее подверженные снижению потерь.

$$\Delta D_{pn} = D_{pk} + 2\sum_{k}^{t} kp_{kt},$$
$$\Delta D_{pm} = \sum_{n \in m} \Delta D_{pn}, \quad (8)$$
$$\Delta D_{p} = D_{pk} + \sum_{m=2}^{N} D_{pm},$$

где D_{pk} - дисперсия в узле, где место размещения СНЭ, ΔD_p и ΔD_{pm} изменение дисперсии в энергосистеме и на уровне.

Благодаря установки СНЭ в одном из узлов энергосистемы возможно уменьшить ее дисперсию, а с помощью формул возможно вычислить изменение дисперсии в узлах и на уровнях энергосистемы.

Для определения возможных мест размещения СНЭ, систему электроснабжения возможно разделить на уровни и сформировать результирующие графики нагрузки для каждого узла. На рисунке 2 представлены выделенные уровни системы электроснабжения.

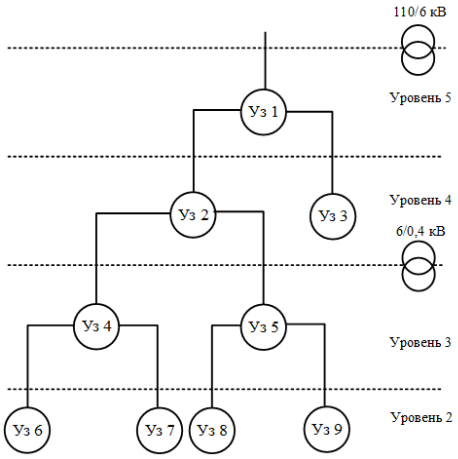


Рис. 2. Выделенные уровни системы электроснабжения: первый уровень – группа электроприемников с паспортной мощностью; второй уровень – распределительные щиты, силовые шкафы и вводно-распределительные устройства; третий и четвертый уровень – секция шин шкафа релейной защиты и автоматики, распределительного устройства и трансформаторной подстанции; пятый уровень – секция шин питающей подстанции

На рисунке 3 показаны суточные графики нагрузки узлов второго уровня для энергосистемы нефтегазодобывающих месторождений. В таблицах 1-4 приведены расчетные параметры для определения места размещения СНЭ для системы электроснабжения нефтегазодобывающих месторождений.

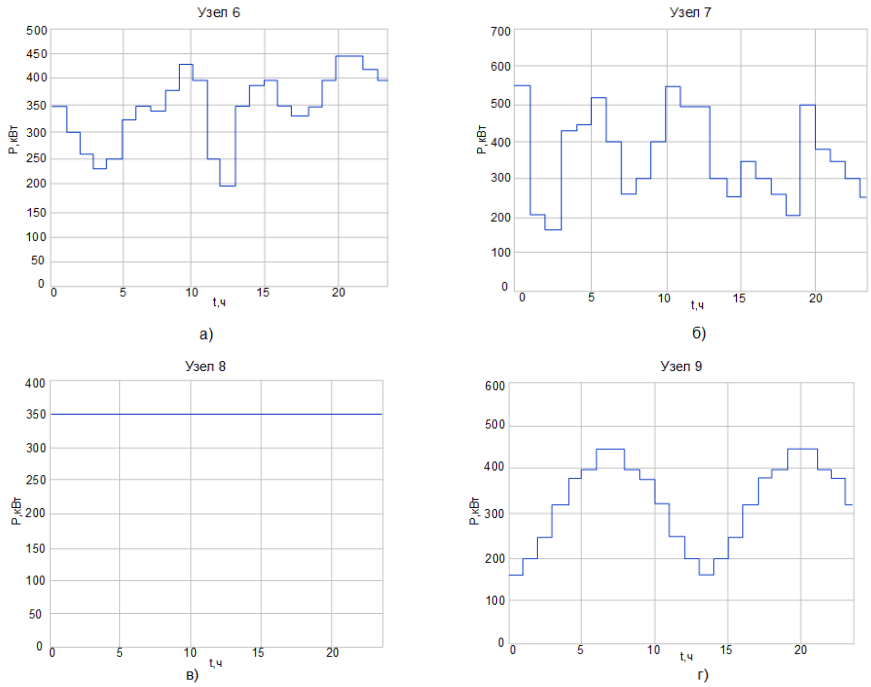


Рис. 3. Суточные графики нагрузки узлов второго уровня

Таблица 1

Параметры графиков нагрузки узлов второго уровня

№ узла	p_c	p_{ck}	D_p	σp	$K_ф$	$K_з$
6	344,9	353,6	4591,7	67,5	1,02	0,76
7	358,8	378	13368	115,0	1,04	0,64
8	349	349	0	0	1	1
9	326,9	339,6	8964,5	93,7	1,03	0,71

Таблица 2

Коэффициент взаимной корреляции

	k_{p6-7}	k_{p6-8}	k_{p6-9}	k_{p7-8}	k_{p7-9}	k_{p8-9}	k_{p3-6}
max знач	-9,6	-0,007	22,9	-0,01	2,3	-0,007	-31,5
	k_{p3-7}	k_{p3-8}	k_{p3-9}	k_{p4-5}	k_{p3-4}	k_{p3-5}	k_{p2-3}
min знач	18,92	-0,03	-93	25,2	-12,6	-93,7	-107,4

Таблица 3

Наибольшее изменение дисперсии в узлах энергосистемы при определении места размещения СНЭ для нефтегазодобывающих месторождений

Место размещения СНЭ (№ узла)	Изменение дисперсии								
	ΔD_{p1}	ΔD_{p2}	ΔD_{p3}	ΔD_{p4}	ΔD_{p5}	ΔD_{p6}	ΔD_{p7}	ΔD_{p8}	ΔD_{p9}
1	3160	-	-	-	-	-	-	-	-
2	8679	30346	-	-	-	-	-	-	-
3	8705	-	30382	-	-	-	-	-	-
4	18611	21291	-	16075	-	-	-	-	-
5	-4709	14168	-	-	8964	-	-	-	-
6	1008	7485	-	2 710	-	4592	-	-	-
7	15621	11913	-	11483	-	-	13368	-	-
8	0	0	-	-	0	-	-	0	-
9	-4815	14173	-	-	8963	-	-	-	8965

Таблица 4

Наибольшее изменение дисперсии в энергосистеме при определении места размещения СНЭ для нефтегазодобывающих месторождений

№ Узла	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сумм. эффект ΔD_p	39179	39054	39278	56273	18320	15918	52579	0	38478

При определении места размещения СНЭ наибольшее воздействие можно получить при выравнивании графика нагрузки в узле 4, т.к. чем больше величина ΔD_p, тем лучше поддается регулированию график нагрузки в этом узле. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет определить оптимальное место размещения СНЭ с целью повышения эффективности регулирования электропотребления и параметров качества электроэнергии при использовании ветроэнергетических установок.

Данный алгоритм дает возможность анализировать параметры качества электрической энергии, позволяя конкретным параметрам электрической сети не выходить за пределы установленных норм. С помощью алгоритма предоставляется возможность оценки изменения графика нагрузки в узле и его влияния на энергосистему нефтегазодобывающих месторождений.

Список литературы

1.ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

2.Требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем», утверждены приказом Минэнерго России от 03 августа 2018 г. № 630.

3.Балуев Д. Ю., Зырянов В. М., Кирьянова Н. Г., Пранкевич Г. А. Применение накопителя энергии для демпфирования колебаний мощности в автономных энергосистемах // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. Сб. материалов 18 Всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск. 2017. С. 181− 187.

4.Зырянов В. М., Кирьянова Н. Г., Нестеренко Н. Г. [и др.]. Энергетические характеристики гибридной системы накопления электрической энергии // Энергия единой сети. 2018. №6 (42). С. 34–43.

5.Кугучева Д. К., Харитонов М. С. Упрощенный алгоритм расчета автономных ветродизельных электростанций с накопителями энергии // Вестник молодежной науки. 2019. № 5 (22). С.1 – 6.

6.Сокольникова Т. В., Суслов К. В., Ломбарди Пио. Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах с активными потребителями // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 10. С. 206 – 211.

7.Пранкевич Г. А. Разработка математической модели и методики выбора параметров накопителя энергии как элемента энергосистемы : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2021. 159 с.

8.Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем : Учеб. для вузов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Инфра-М, - 2019. 592 с.

9.Брагин, А. А. Алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия с применением аккумуляторных батарей в качестве потребителей-регуляторов мощности: дисс…канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2013. 130 с.

10. Извеков Е. А., Косенков Р. И. Перспективы применения накопителей энергии в электроэнергетических системах // Новые технологии и технические средства для эффективного развития АПК: материалы национальной научно-практической конференции Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра. Воронеж, Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. 2019. С. 132 – 140.

11. Балуев Д. Ю., Зырянов В. М., Кирьянова Н. Г. [и др.]. Методика расчета основных параметров накопителя энергии по экспериментальным нагрузочным диаграммам // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5. С. 105 – 114.

12. Рубан Н. Ю., Аскаров А. Б., Андреев М. В. [и др.]. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 36. С. 7 – 30.

13. Lund P., Paatero J. V. Energy storage options for improving wind power quality // Helsinki University of Technology. Advanced Energy Systems. – January 2006. P. 1 – 8.

14. De Matos J. G., F. S. F. de Silva, L. A. de S. Ribeiro. Power Control in AC Isolated Microgrids With Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 62, Issue: 6, June 2015. P. 3490 – 3498.

15. Kinjo T., Urasaki N., Fujita H. Output levelling of renewable energy by electric double-layer capacitor applied for energy storage system // IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume: 21, Issue: 1, March 2006. P. 221 – 227.

16. Root C., Presume H., Proudfoot D., Willis L., Masiello R. Using battery energy storage to reduce renewable resource curtailment // 2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), April 2017. P. 1 – 5.

17. Mur J., Bayod A. A., Zapata R., Ortiz S. An Experimental Study on Power Quality of Wind Turbines // Universidad de Zaragoza – Dpto. Ingenieria Electrica. CIRCE. P. 1 – 6.

18. Zhu B., Tazvinga H., Xia X. Switched model predictive control for energy dispatching of a photovoltaic-diesel-battery hybrid power system. IEEE Trans Control // IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 23, no. 3, May 2015, P. 1229 – 1236.

19. Rahbar K., Xu J., Zhang R. Real-Time Energy Storage Management for Renewable Integration in Microgrid: An Off-Line Optimization Approach // IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, Issue: 1, Jan. 2015. P. 124 – 134.

20. Khalid M., Akram U., Shafiq S. Optimal Planning of Multiple Distributed Generating Units and Storage in Active Distribution Networks // IEEE Access, Vol. 6, 2018. P. 55234 – 55244.

21. Махмутова В. Р., Хмара Г. А. Анализ коэффициента запаса статической устойчивости энергосистем с возобновляемыми источниками энергии // Новые технологии - нефтегазовому региону. Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В IV томах. Тюмень, 2022. С. 34 – 37.

22. Махмутова В. Р., Хмара Г. А. Анализ электромагнитных переходных процессов при трехфазных коротких замыканиях в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии // Инновации. Интеллект. Культура. Материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной 435-летию основания г. Тобольска, году Данилы Чулкова в г. Тобольске. Тюмень, 2022. С. 157 – 161.

23. Степанов О. А., Чекардовский М. А., Махмутова В. Р., Хмара Г. А. Исследование влияния накопителей электрической энергии на параметры качества переходных процессов в гибридных энергосистемах с ветроэлектрическими установками // Промышленная энергетика. 2023. №10. С. 25 – 33.

Махмутова Валерия Рушановна, аспирант, lera.maxmutova95@mail.ru, Россия, Тюмень, Тюменский Индустриальный Университет,

Хмара Гузель Азатовна, канд. техн. наук, доцент, hmaraga@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский Индустриальный Университет,

Хамитов Рустам Нуриманович, д-р техн. наук, профессор, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

ALGORITHM FOR SELECTING LOCATIONS FOR ENERGY STORAGE DEVICES FOR THE POWER SUPPLY SYSTEM OF OIL AND GAS FIELDS

R.N. Khamitov, G.A. Khmara, V.R. Makhmutova

The article discusses the joint use of renewable energy sources and energy storage systems for the power supply system of oil and gas fields. An algorithm has been developed for selecting the location of an energy storage system for oil and gas fields in order to reduce the adverse impacts on power quality parameters due to power fluctuations. It has been established that when determining the location of the energy storage system, the greatest impact can be obtained by leveling the load curve at the node where the magnitude of the change in dispersion in the power system is greater. Thus, the proposed algorithm makes it possible to determine the optimal location for placing an energy storage system in order to increase the efficiency of regulation of power consumption and power quality parameters when using wind power plants. Using the algorithm, it is possible to assess changes in the load schedule in a node and its impact on the energy system of oil and gas fields.

Key words: renewable energy sources, energy storage devices, dispersion, cross-correlation coefficient, load curve parameters, power quality parameters.

Makhmutova Valeria Rushanovna, postgraduate, lera.maxmutova95@mail.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University,

Khmara Guzel Azatovna, candidate of technical sciences, docent, hmaraga@tyuiu.ru, Russia, Tyumen, Tyumen Industrial University,

Khamitov Rustam Nurimanovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 004.414.32
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-126-127

МЕТОДИКА УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ С ФОТОКАМЕРЫ

Н.Б. Назаров, И.Н. Набродова

Рассмотрены методы обработки изображений, а также алгоритмы их работы, которые можно использовать при создании автоматизированной системы для улучшений качества изображения. Также были рассмотрены случаи применения данных методов.

Ключевые слова: гистограмма, нелинейная коррекция, линейная коррекция, шум и шумоподавление, гамма-коррекция, логарифмическая коррекция, яркость, контрастность.

Существуют различные методы обработки изображений: повышение или понижение контрастности, яркости, гамма-обработки и т.д. Целью применения методов обработки изображений является улучшение качества изображения, чтобы оно стало более подходящим для конкретного приложения или области: распознаваемый текст (например, номерные знаки автомобилей), распознаваемые объекты в кадре (например, силуэты темных объектов в затемненных участках изображения), цветокоррекция при съемке с плохим или недостаточным освещением, устранение шумов и потерю данных изображения. Цифровая обработка изображений позволяет использовать гораздо более сложные алгоритмы и, следовательно, может предложить как более сложную производительность при выполнении простых задач, так и реализацию методов, которые были бы невозможны аналоговыми средствами.

Основными задачами данных методов являются:

выравнивание тона изображения;

восстановление естественных цветов;

повышение распознаваемости объектов на изображении;

устранение шума в изображениях;

усиления полезной и подавления нежелательной (в контексте конкретной задачи) информации [1].

Рассмотрим некоторые из них.

1. Гистограмма яркости – это график распределения полутонов изображения, в котором по горизонтальной оси представлена яркость, а по вертикали – относительное число пикселов с данным значением яркости.

Для анализа изображений можно использовать гистограммы яркости. Гистограммы строят как для цветных изображений по каждому из каналов, так и для изображений в оттенках серого [2].

Алгоритм построения гистограммы:

строим массив, заполненный нулями. Обычно массив [0..255];

выделяем нужный цветовой фильтр.

массив заполняем числами, где каждому пикселю соответствует своё значение;

полученное значение должно укладываться в диапазон индексов массива, например [0..255];

увеличиваем значение элемента массив[значение] на 1;

конец цикла.

Полученный массив и представляет собой гистограмму, элементы массива – означают высоты столбиков.

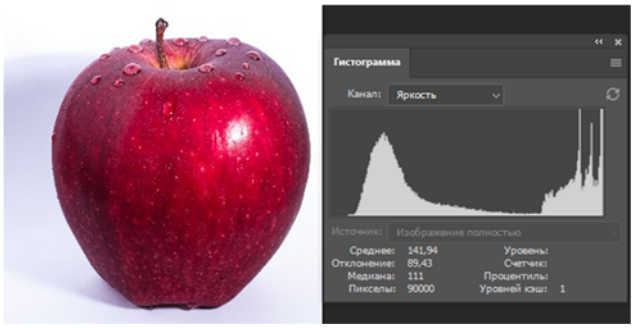


Рис. 1. Гистограмма яркости

2. Линейная коррекция – это метод обработки изображений, обеспечивающий растяжку всего диапазона изменения интенсивностей.

Линейная тоновая коррекция использует в качестве математического аппарата простейшие линейные функции. Задача линейной коррекции связана с улучшением согласования динамического диапазона изображения и экрана, на котором выполняется визуализация. Если для цифрового представления каждого отсчета изображения отводится 1 байт (8 бит) запоминающего устройства, то входной или выходной сигналы могут принимать одно из 256 значений. Обычно в качестве рабочего используется диапазон 0-255; при этом значение 0 при визуализации соответствует уровню черного, а значение 255 – уровню белого [3].

Рис. 2. Линейная коррекция

3. Нелинейные коррекции – это метод обработки изображений, для коррекции тонов в цветном и черно-белом фильтре.

В нелинейной коррекции часто применяются:

Гамма-коррекция. Изначально цель коррекции для правильного отображения изображения на мониторе.

Логарифмическая коррекция. Цель – сжатие динамического диапазона при визуализации данных.

4. Гамма-коррекция – это наилучший способ равномерного осветления или затемнения изображений. В его основе лежит математический аппарат степенных функций с показателем гамма, из-за чего эта процедура и получила свое название. Уникальность гамма-коррекции – в её связи с человеческим восприятием. Наше зрение логарифмично – для глаза важна не абсолютная разница в яркости, а относительное изменение. В темной комнате свет фонарика кажется невероятно сильным, а днем на улице вы даже не заметите создаваемого им светового пятна. То же и с изображением: нельзя просто добавить каждому пикселю определенный уровень яркости – нужно придерживаться логарифмической шкалы, что и обеспечивает гамма-функция [4].

Алгоритм гамма-коррекции:

1) строим массив, заполняем нулями. Обычно массив [0..255];
2) находим яркость по формуле $y=c*x^j$, и заполняем массив, где каждому значению соответствует свой пиксель, полученное значение должно укладываться в диапазон индексов массива [0..255];
3) увеличиваем значение элемента массив[значение] на 1;
4) конец цикла.

Полученный массив представляет собой измененное изображение, элементы массива – означают обработанные пиксели.

Рассмотрим работу метода на изображении. Используя гамма-корреляцию, мы можем устранить темные участки изображения (рис. 1).

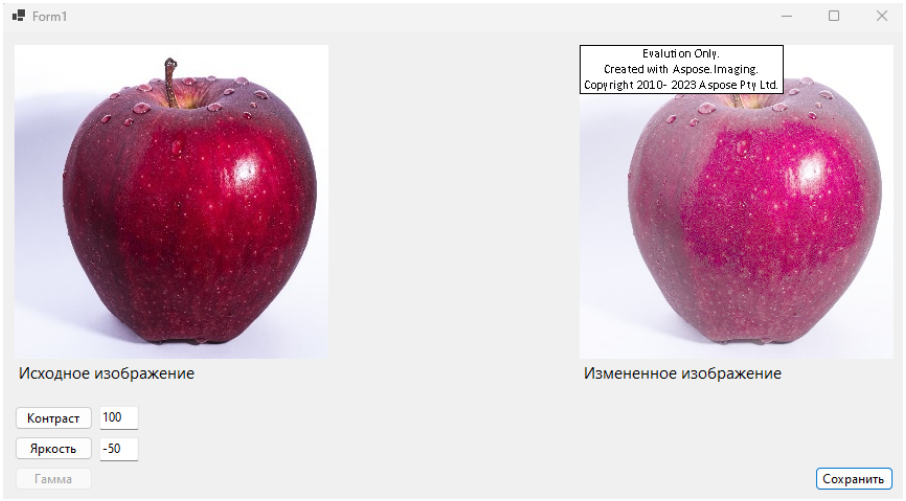


Рис. 3. Гамма-коррекция

5. Шумоподавление – это устранение недостатков при плохом освещении или же устранение несовершенства камеры.

Причинами возникновения шума могут быть:
- несовершенство приборов (фотоаппаратов, теле/видеокамер);
- обработка изображений с потерей данных.

Виды шума:
- «Соль и перец» – это случайные чёрные и белые пиксели;
- импульсный – это случайные белые пиксели;
- Гауссов шум – это колебания яркости, распределённые по нормальному закону.

Для устранения Гауссова шума применяется фильтр Гаусса.

Для устранения шума соль и перец и импульсного шума применяется медианный фильтр. Это метод выравнивания освещения на изображении. Само изображение формируется как произведение низких и высоких частот, то есть самого освещения и объекта [5].

Рис. 4. Устранение шума

6. Яркость – количество белого цвета на изображении. Контрастность – это разница между расположенными рядом цветами.

Также, одним из методов устранения шума может являться изменение яркости (рис. 5 и рис. 6) и контрастности.

Значения яркости находятся в диапазоне от 0 до 255. Для того чтобы яркость можно было уменьшать и увеличивать, значения яркости берут в диапазоне от -255 до 255, затем по формуле вычисляют цвет и приводят к диапазону от 0 до 255. Для этого используется формула $Pixel[x, y] = Pixel[x, y] + brightness$, где x и y – координаты пикселя, а $brightness$ – значение яркости.

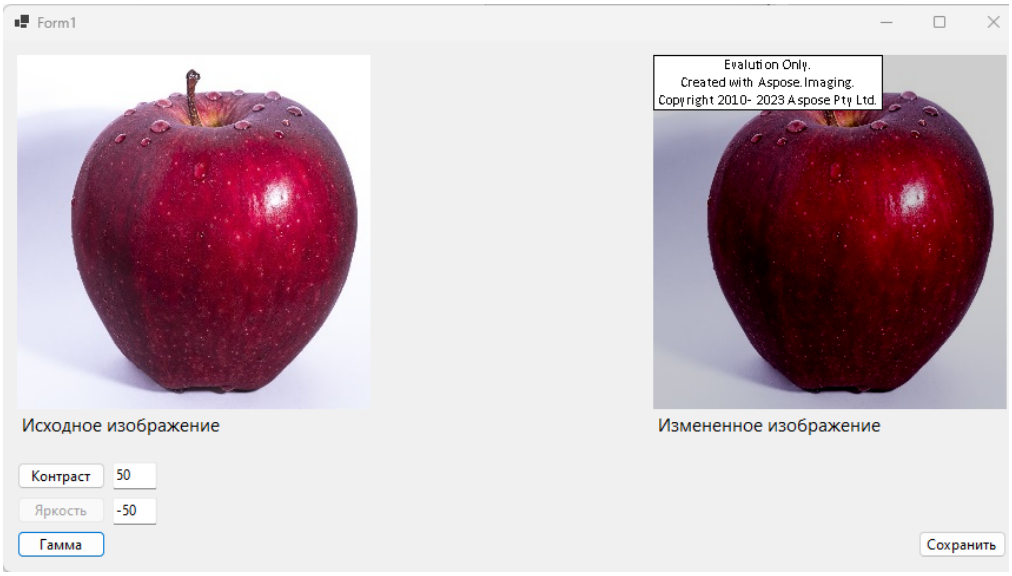


Рис. 5. Изменение яркости на -50

Также данном случае можно избавиться от светлых участков изображения (например, при съемке с ярким освещением).

При увеличении яркости можно избавиться от тёмных участков изображения (например, во время съёмки при недостаточном освещении).

Изменение контрастности изображение поможет изменить насыщенность цветов в картинке (рис. 7 и рис. 8) [6].

Алгоритм изменения контрастности изображения:

Для каждого пикселя изображения для каждой из цветовых компонент R, G, и B мы должны найти отклонение от среднего значения яркости delta, и это отклонение умножить на коэффициент усиления или ослабления контраста k.

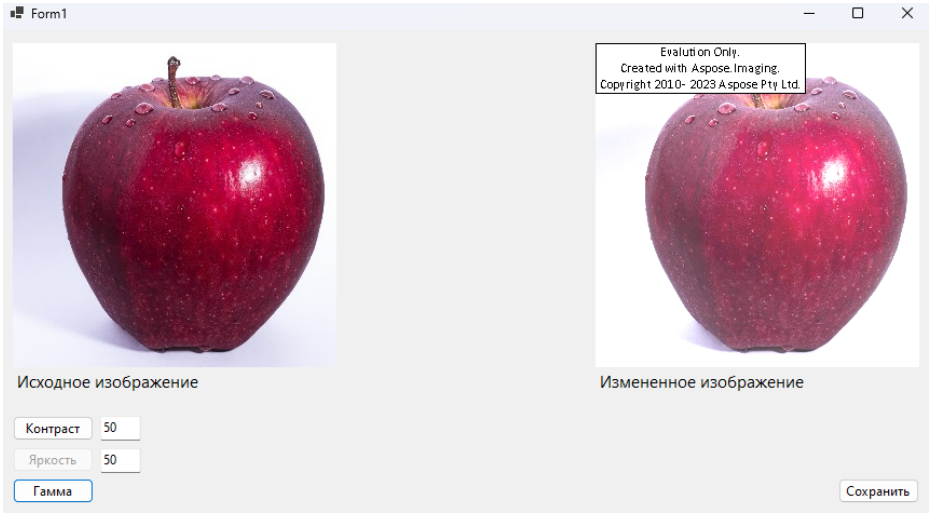


Рис. 6. Изменение яркости на 50

Рис. 7. Изменение контраста на 50

Данный метод делает изображение более насыщенным.

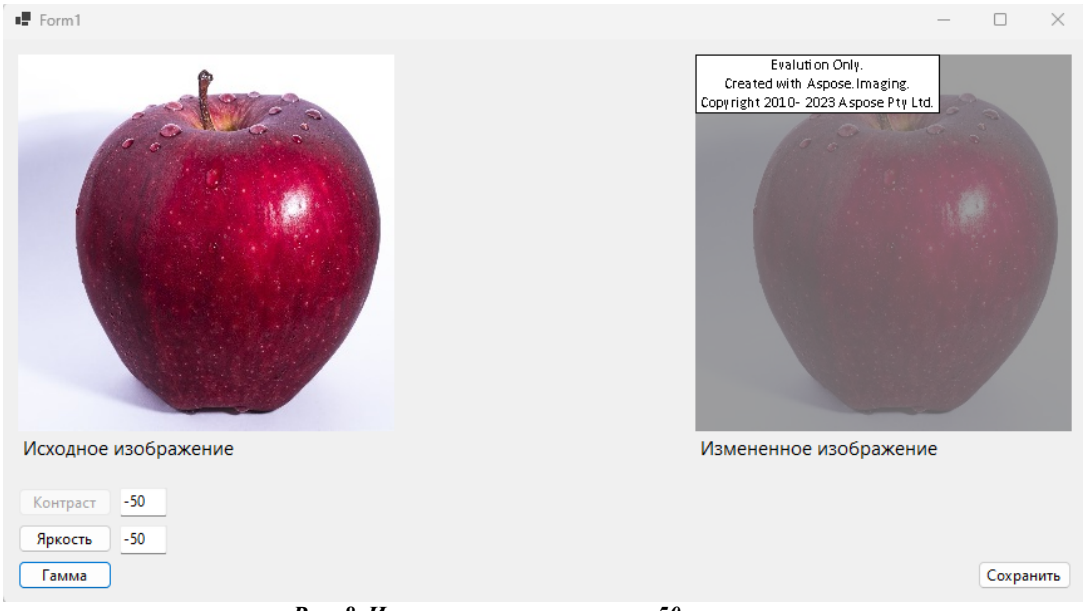


Рис. 8. Изменение контраста на -50

В данном случае можно избавиться от перенасыщенной картинки и сделать ее более естественной.

Исходя из рассмотренных выше методов обработки изображений можно сказать, что не существует универсального метода улучшения качества изображения, поэтому к разным изображениям необходимо применять те методы обработки, которые дадут лучший результат. Также при применении метода необходимо учесть интенсивность применяемого эффекта. Например, если фотография сделана в солнечную погоду на улице и слишком переосвещено, то можно понизить яркость на 30, а если фотография сделана в помещении, то можно понизить яркость на 10-15. Такие же условия обработки применимы к остальным методам улучшения качества изображения, где в зависимости от недостатков изображения применяется определенная интенсивность метода обработки.

Список литературы

1. Digital image processing [Электронный ресурс] URL: https/en.wikipedia.org/wiki/Applications_of_image_processing (дата обращения: 10.05.2023).
2. Гистограмма [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Гистограмма_(фотография) (дата обращения: 10.05.2023).
3. Базовые методы обработки изображений [Электронный ресурс] URL: http://mechanoid.su/cv-base.html (дата обращения: 10.05.2023).
4. Гамма-коррекция [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Гамма_коррекция (дата обращения: 10.05.2023).
5. Шумоподавление посредством усреднения изображений [Электронный ресурс] URL: https://www.cambridgeincolour.com/ru/tutorials-ru/image-averaging-noise.htm (дата обращения: 10.05.2023).
6. Реализация RGB-алгоритма изменения контраста изображения [Электронный ресурс] URL: https://habr.com/ru/articles/139428 (дата обращения: 10.05.2023).

Назаров Нурлан Бахтиярович, магистр, nazarov.nurlan121@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Набродова Ирина Николаевна, канд. техн. наук, доцент, ira1978@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

A METHOD FOR IMPROVING IMAGE QUALITY BASED ON THE ANALYSIS OF INFORMATION FROM THE CAMERA

N.B. Nazarov, I.N. Nabrodova

The methods of image processing are considered, as well as the algorithms for their work, which can be used to create an automated system for improving image quality. Cases of application of these methods were also considered.

Key words: histogram, non-linear correction, linear correction, noise and noise reduction, gamma correction, logarithmic correction, brightness, contrast.

Nazarov Nurlan Bakhtiyarovich, master, nazarov.nurlan121@gmail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nabrodova Irina Nikolaevna, candidate of technical sciences, docent, ira1978@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.396
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-130-131

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДВИЖУЩУЮСЯ ЦЕЛЬ СО СТОРОНЫ МИКРОПРОФИЛЯ МЕСТНОСТИ

В.Л. Румянцев, Д.В. Смыляев, А.Н. Карпов

Приведены результаты моделирования микропрофиля местности на ходовую часть движущейся цели. Статистические свойства возмущающих воздействий дорог описаны корреляционными функциями и спектральными. Для нахождения алгоритма моделирования использован метод формирующего фильтра. Оценка эффективности указанного алгоритма производена методом сравнения требуемой спектральной плотности с оценкой спектральной плотности, полученной по выборке случайного процесса в результате ее цифровой обработки.

Ключевые слова: микропрофиль местности, формирующий фильтр, спектральная плотность, преобразование Фурье.

Стремление повысить точность математического моделирования ошибок пеленга движущихся целей выдвинуло в качестве одной из основных проблем решение задачи моделирования возмущающих воздействий на ходовую часть цели со стороны статистически-шероховатой подстилающей поверхности.

В работах [1-3] показано, что по характеру неровностей и степени их влияния на элементы ходовой части и подрессоренную массу цели, профиль местности можно разделить на три составляющие: макропрофиль, микропрофиль и шероховатости. Макропрофиль определяет траекторию движения цели и приводит к медленным изменениям математических ожиданий смещения угла пеленга и центра тяжести цели $m_\theta(t)$, $m_y(t)$, вносящим нестационарность в процесс флуктуаций положения радиолокационного центра отражения.

Микропрофиль характеризуется неровностями, вызывающими значительные колебания подрессоренной массы по углам рыскания $\phi(t)$, тангажа $\Phi(t)$, крена $\Gamma(t)$ и является определяющим фактором изменения координат блестящих точек цели. Шероховатости, в основном, сглаживаются гусеницами и существенного влияния на ходовую часть не оказывают.

В общем случае ординаты микропрофиля дороги, а следовательно, и его возмущающие воздействия $q(t)$ являются нестационарными случайными процессами. Однако, как показано в работах [1, 2], на ограниченных участках дорог при постоянной скорости движения воздействия $q(t)$ можно рассматривать как стационарные, обладающие при центрировании свойством эргодичности.

В связи с этим, статистические свойства возмущающих воздействий дорог достаточно полно могут быть описаны корреляционными функциями $R_q(\tau)$, спектральными плотностями $S_q(\omega)$ и одномерными законами распределения. При этом, практически для всех встречающихся типов дорог, корреляционные функции и соответствующие им спектральные плотности возмущающих воздействий микропрофиля по левой и правой колеям могут быть аппроксимированы выражением вида

$$R_q(\tau) = \sigma_q^2 \sum_{i=1}^{2} A_i e^{-\omega'_{ui}/\tau/} \left[\cos \omega_i^* \tau + \frac{\omega'_i}{\omega_i^*} \sin \omega_i^* / \tau / \right], \tag{1}$$

$$S_q(\omega) = \frac{4\sigma_q^2}{\pi} \sum_{i=1}^{2} A_i \omega'_i \frac{(\omega'_i)^2 + (\omega_i^*)^2}{\left[\omega^2 + (\omega'_i)^2 + (\omega_i^*)^2 \right]^2 - 4\omega^2 (\omega_i^*)^2}, \tag{2}$$

где σ_q^2 – дисперсия возмущающих воздействий микропрофиля дороги; $\omega' = \omega'_0 \cdot v$; $\omega^* = \omega_0^* \cdot v$; v – скорость движения цели; ω'_0, ω_0^* – коэффициенты корреляционной связи при единичной скорости v_0; A_i – коэффициенты, причем $\sum_{i=1}^{2} A_i = 1 \cdot$

Экспериментальные значения коэффициентов, входящих в выражения (1), (2) для некоторых типов подстилающих поверхностей, приведены в таблице.

Значение коэффициентов корреляционной связи микропрофиля местности

№ п/п	Тип дороги	$\sigma_q^2 \cdot 10^{-4}$, м^2	A_1	A_2	ω'_{01}, м$^{-1}$	ω'_{02}, м$^{-1}$	ω_{01}^*, м$^{-1}$	ω_{02}^*, м$^{-1}$
1.	Танковая трасса	10-13	1	0	0,014-0,11	0	0,0125-0,140	0,235
2.	Разбитая грунтовая дорога	3-10	0,55	0,45	0,085	0,08	0,75-0,9	0
3.	Проселочная изношенная дорога	4-5	1	0	0,2-0,4	0	0,94	0
4.	Проселочная мало изношенная дорога	1,9	1	0	0,47	0	0,75-0,9	0
5.	Изношенное гравийное шоссе	3,4-4,2	1	0	0,5-0,7	0	0,75-0,9	0,2-2,7
6.	Сильно изношенное булыжное шоссе	3,3-4	0,65-0,85	0,35-0,15	0,3-0,5	0,25-0,3	0	0,75
7.	Мало изношенное булыжное шоссе	1,43-1,5	0,75	0,25	1,5	0,15	0,55-0,65	0
8.	Изношенное асфальтовое шоссе	1,22-2,36	1	0	1,17-1,3	0	0	0
9.	Мало изношенное асфальтовое шоссе	0,38-0,61	0,15	0,55	2,5	0,32	0,65	1,1-1,3
10.	Изношенное цементно-бетонное шоссе	1,22-2	0-0,65	0,35-0,5	0,15-0,2	0,15-0,2	0	0
11.	Мало изношенное цементобетонное шоссе	0,5-1,2	1	0	0,15	0	0	0

На рис. 1 в качестве иллюстрации представлены некоторые кривые спектральных плотностей $S_q(\omega)$, построенные по соотношению (2) на основе данных таблицы.

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что основная энергия возмущающих воздействий $q(t)$ при скоростях движения цели от 0 до 10 м/с приходится на диапазон частот от 0 до 3 Гц. Дорожные возмущения не оказывают существенного влияния на ходовую часть цели на больших частотах.

Дорожные возмущения не оказывают существенного влияния на ходовую часть цели на больших частотах. Это объясняется малыми высотами коротких неровностей. Задача цифрового моделирования возмущающих воздействий микропрофиля с указанными статистическими характеристиками сводится к нахождению алгоритмов, позволяющих получить на ЦВМ реализации нормального случайного процесса со спектральной плотностью, аппроксимируемой дробно-рациональной функцией вида (2).

Для нахождения таких алгоритмов целесообразно воспользоваться методом формирующего фильтра [4, 5]. Этот метод предполагает синтез линейной системы, преобразующей дельтакоррелированный случайный процесс (белый шум) в стационарный случайный процесс с заданной спектральной плотностью $S_q(\omega)$.

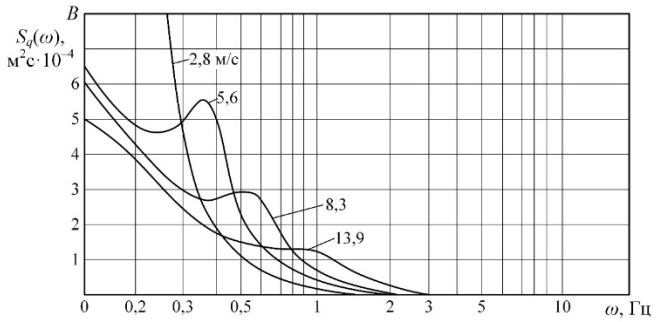


Рис. 1. Спектральные плотности возмущающего воздействия на цель разбитой грунтовой дороги

Запишем выражение (2) в виде:

$$S_q(\omega)=\frac{P(\omega)}{Q(\omega)}, \tag{3}$$

где $P(\omega)$, $Q(\omega)$ – полиномы относительно ω.

Для определения корней полиномов в соответствии с выражением (3) необходимо решить следующее алгебраическое уравнение:

$$A_1\omega_1'K_1^2\left[(\omega^2+K_2^2)^2-4\left(\omega_2^*\right)^2\right]+A_2\omega_2'K_2^2\left[(\omega^2+K_1^2)^2-4\left(\omega_1^*\right)^2\omega^2\right]=0, \tag{4}$$

где $K_1^2=(\omega_1')^2+\left(\omega_1^*\right)^2$, $K_2^2=(\omega_2')^2+\left(\omega_2^*\right)^2$.

После несложных вычислений корни уравнения (4) можно записать в виде:

$$\omega=\pm\sqrt{\frac{c\pm j\sqrt{ab-c^2}}{a}}, \tag{5}$$

где

$$a=A_1\omega_1'K_1^2+A_2\omega_2'K_2^2;\ b=K_1^2K_2^2\left(A_1\omega_1'K_2^2+A_2\omega_2'K_1^2\right);\ c=A_1\omega_1'K_1^2\left[(\omega_1')^2-\left(\omega_1^*\right)^2\right]+A_2\omega_2'K_2^2\left[(\omega_2')^2-\left(\omega_2^*\right)^2\right].$$

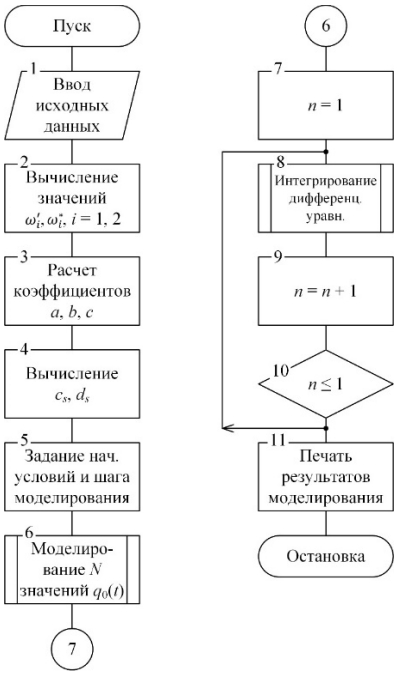


Рис. 2. Блок-схема моделирования возмущающих воздействий микропрофиля местности

Переписав (5) в тригонометрической форме и осуществив ряд дополнительных преобразований [6], получим корни полиномов, лежащие в верхней полуплоскости:

$$\omega_1=C_s+jd_s;\quad \omega_2=-C_s+jd_s, \tag{6}$$

$$C_s=\sqrt[4]{\frac{b}{a}}\cdot\sqrt{\frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{ab-c^2}{ab}}\right)},\quad d_s=\sqrt[4]{\frac{b}{a}}\cdot\sqrt{\frac{1}{2}\left(1-\sqrt{\frac{ab+c^2}{ab}}\right)}.$$

На основе выражения (6) систему линейных стохастических дифференциальных уравнений формирующего фильтра нетрудно записать в виде

$$\begin{cases} \dfrac{d^2 q_1(t)}{dt^2} + 2\omega_1' \dfrac{dq_1(t)}{dt} + \left[(\omega_2')^2 + \left(\omega_2^*\right)^2 \right] q_1(t) = q_0(t); \\ \dfrac{d^2 q(t)}{dt^2} + 2\omega_1' \dfrac{dq(t)}{dt} + \left(\omega_1' + \omega_1^*\right) q(t) = 2\sigma_q \sqrt{a} \left(\dfrac{d^2 q_1(t)}{dt^2} + 2d_s \dfrac{dq_1(t)}{dt} + \dfrac{b}{a} q_1(t) \right), \end{cases}$$

где $q(t)$ – искомый случайный процесс, $q_1(t)$ – вспомогательная функция, $q_0(t)$ – дельтакоррелированный случайный процесс.

Блок-схема алгоритма цифрового моделирования значений возмущающих воздействий микропрофиля дороги представлена на рис. 2.

Оценка эффективности указанного алгоритма производилась методом сравнения требуемой спектральной плотности с оценкой спектральной плотности, полученной по выборке случайного процесса в результате ее цифровой обработки на основе финитного преобразования Фурье и ядра Хана [5, 6]. Исследования показали, что уже при 200 элементах выборки требуемая спектральная плотность попадает в 20 % доверительный интервал выборочной оценки с вероятностью ≥ 0,9.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет учитывать различие типов подстилающих поверхностей с точки зрения их влияния на ходовую часть объекта при моделировании динамики его движения.

Список литературы

1. Кулемин Г.П., Разсказовский В.Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. Киев: Наук. Думка, 1987. 205 с.

2. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М.: Радио и связь, 1986. 181с.

3. Beckman P., Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. Oxford, Pergamon Press, 1963.

4. Понятский В.М. Разработка алгоритмов параметрической идентификации динамического объекта на основе теории фильтрации Калмана // Известия Тульского государственного университета. Вып 2. 1999. С. 256-259.

5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М: Радио и связь, 1989. 653 с.

6. Степанов В.Л., Ганэ В.А., Куклев Е.А. Системы управления при скачкообразных воздействиях. Мн.: Наука и техника, 1985.

Румянцев Владимир Львович, д-р техн. наук, профессор, начальника отдела, cdbae@cdbae.ru, Россия, Тула, Центральное конструкторское бюро аппаратостроения (ЦКБА),

Смыляев Дмитрий Вячеславович, адъюнкт, paii@mil.ru, Россия, Пенза, Пензенский Артиллерийский Инженерный Институт имени Главного Маршала Артиллерии Н.Н.Воронова,

Карпов Александр Николаевич, адъюнкт, Россия, Пенза, Пензенский Артиллерийский Инженерный Институт имени Главного Маршала Артиллерии Н.Н.Воронова

MATHEMATICAL MODEL OF DISTURBING INFLUENCES ON A MOVING TARGET FROM THE MICRO PROFILE OF THE TERRAIN

V.L. Rumyantsev, D.V. Smyshlyaev, A.N. Karpov

The results of modeling the micro profile of the terrain on the undercarriage of a moving target are presented. Statistical properties of disturbing effects of roads are described by correlation functions and spectral ones. To find the simulation algorithm, the method of the forming filter is used. The efficiency of this algorithm is evaluated by comparing the required spectral density with the spectral density estimate obtained from a random process sample as a result of its digital processing.

Key words: micro profile of the terrain, forming filter, spectral density, Fourier transform.

Rumyantsev Vladimir Lvovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, Russia, Tula, Central Design Bureau of Hardware Engineering (CCBA),

Smyshlyaev Dmitry Vyacheslavovich, adjunct, paii@mil.ru, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute named after Chief Marshal of Artillery N.N. Voronov,

Karpov Alexander Nikolaevich, adjunct, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute named after Chief Marshal of Artillery N.N. Voronov

УДК 621.9.08
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-134-135

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

И.А. Ходжаев, А.М. Соловьев, А.Л. Гудиков

В статье рассматриваются информативные определяющие параметры, пригодные для прогнозирования технического состояния цифровых систем передачи в процессе их эксплуатации при использовании гибких стратегий технического обслуживания и ремонта.

Ключевые слова: техническое состояние, информативные параметры цифровых систем передачи, стратегия технического обслуживания по состоянию, постепенный и внезапный отказы, алгоритм прогнозирования.

Задача предотвращения отказов аппаратуры связи для бесперебойной передачи информации на значительные расстояния существовала со времен создания такой аппаратуры. Первые разработки радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) относятся к так называемым аналоговым системам. Качество таких систем оценивалось по таким параметрам, как мощность передатчика, коэффициент шума приемника, уровень на выходе каналообразующей аппаратуры и др. На определяющие параметры РЭА задавалась область допустимых значений, и, если в процессе эксплуатации эти параметры выходили за пределы допустимых значений, аппаратура признавалась неисправной (отказ РЭА). Если процесс дрейфа параметров обладает свойствами инерционности и монотонности, появляется возможность спрогнозировать его поведение на некоторый интервал времени в будущем. Зная, когда параметр пересечет границу области допустимых значений, отказ РЭА можно предотвратить путем регулировки или замены элемента РЭА, находящегося в предотказовом состоянии. Такая стратегия технического обслуживания (ТО) аппаратуры называется гибкая стратегия ТО по состоянию. Она считается наиболее перспективной и обеспечивает высокие показатели надежности РЭА.

С переходом к цифровым системам передачи информации (ЦСП) параметры, определяющие техническое состояние цифрового канала, совершенно другие. Какими из них можно воспользоваться для нужд прогнозирования технического состояния для предотвращения отказов этой современной аппаратуры связи? Проведем анализ параметров цифрового сигнала, которые заложены в различных методиках измерений современных цифровых каналов связи.

Согласно рекомендаций ITU-T G.821, G.826 и M.2100 параметров, измеряемых в бинарном цифровом канале 28 [1-3]. Три из них являются основополагающими (первичными):

1. BIT или BIT ERR (bit errors) – число ошибочных битов.

2. BER или RATE (bit error rate) – частота битовых ошибок, равный отношению числа битовых ошибок к общему числу бит, переданных за время проведения теста по каналу, находящемуся в состоянии готовности.

3. ES (errors seconds) – длительность поражения сигнала ошибками, количество секунд с ошибками [4].

Остальные параметры являются производными от этих трех. Многие из оставшихся 25 параметров продублированы в относительных единицах (в процентах). Например, AS (availability seconds) и AS (%); DGRM (degraded minutes) и DGRM (%); EFS (error free seconds) и EFS (%) …

В указанных выше рекомендациях [1-3] к основным параметрам причисляют и другие: по рекомендации G.821 AS (%) –параметр, характеризующий готовность канала; по G.826 важными параметрами признаются BBE (background block error) – блок с фоновой ошибкой и BBER (background block error rate); по M.2100 EFS (error free seconds) – время, свободное от ошибок в секундах. Распространенный параметр определения ошибок реально работающего канала без его отключения и без передачи тестовой последовательности – это CRC ERR (Cycle Redundancy Check errors) – параметр ошибки, измеренный с использованием циклового избыточного кода (CRC). Анализ этих параметров показал, что все они связаны с результатом измерений трех вышеуказанных основополагающих параметров: BIT, BER и ES. Измерения по этим параметрам вошли в методики измерений как первичных, так и вторичных сетей. Используя принцип «разумной достаточности» при проведении эксплуатационных измерений предлагается прогнозировать процесс изменения технического состояния цифрового канала не по всем 28 параметрам, а по результатам периодического контроля трех первичных параметров. Это будет тоже многофакторный анализ, но с существенно меньшими объемами обрабатываемой апостериорной информации.

Особенность цифровых систем передачи (рис. 1) заключается в том, что, зачастую, ухудшение значения измеряемого параметра долгое время не приводит к ухудшению качества канала связи. Это происходит за счет использования специальных алгоритмов синхронизации и обнаружения ошибочных битов при регенерации передаваемой информации в приемном или промежуточном регенераторе. Чаще всего каналы ЦСП являются составными: они содержат два и более участка магистральной первичной сети. В качестве среды распространения сигнала (линии связи) могут использоваться радиоэфир, электрические кабели и оптоволокно.

При накоплении (насыщении ошибочными битами) в определенной степени значения измеряемого параметра на каком-то участке тракта передачи происходит обвал (резкое ухудшение) качества канала связи между конечными абонентами цифровой системы передачи.

Здесь возникает вопрос о возможности применения прогнозирования, если оценивать качество цифрового канала только на его выходе. Описанная специфика выходных показателей цифрового канала показывает, что требования к прогнозируемым параметрам по инерционности и монотонности процесса их дрейфа могут не выполняться. Но если мы узнаем, на каком участке составного канала связи происходит накопление ошибочных битов, можно спрогнозировать его отказ, а значит и отказ всего канала. То есть, чем больше контрольных точек в составном канале будем диагностировать, тем точнее можно будет определять техническое состояние объекта в будущие моменты времени. Кроме того, такое детальное диагностирование позволит быстрее найти отказавший элемент и восстановить полноценное функционирование рассматриваемого канала связи.

Конечно в основу всех процессов ухудшения качества каналов связи как аналоговых, так и цифровых положен процесс деградации линий связи или элементов РЭА. Если нет возможности отследить этот процесс, то отказ, возникший вследствие этого, называется внезапным, эти отказы нельзя спрогнозировать. Для прогнозирования постепенных отказов ЦСП следует периодически оценивать (кроме выделенных выше цифровых) и аналоговые параметры линий связи и РЭА, например, остаточное затухание (усиление), мощность передатчика, коэффициент шума приемника и др. Процесс изменения этих параметров, как правило, обладает необходимыми свойствами для прогнозирования.

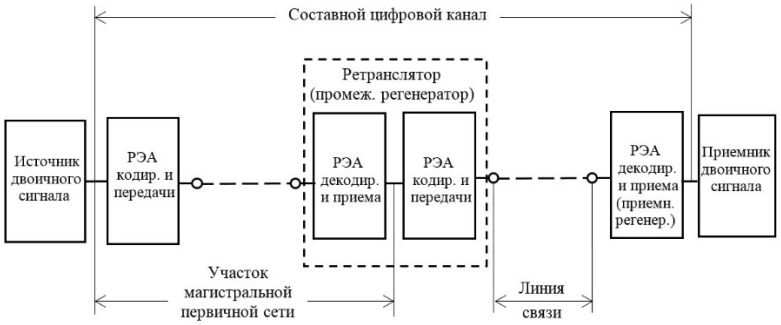


Рис. 1. Передача информации по бинарному цифровому каналу

Опыт показывает, что и параметры BIT, BER и ES не всегда, но также могут изменяться во времени. Их все равно придется контролировать при ТО аппаратуры и, если они станут информативными (обладающими свойствами инерционности и монотонности) на некотором заданном интервале времени эксплуатации, то и по ним можно построить прогноз исправности канала в будущие моменты времени.

Еще один новый (в отличие от аналоговых систем передачи) измеряемый параметр цифрового сигнала – это джиттер (фазовое дрожание). В связи объективными трудностями фазовых измерений появилось прикладное рассмотрение джиттера как вариации частоты принимаемого цифрового сигнала (рис. 2).

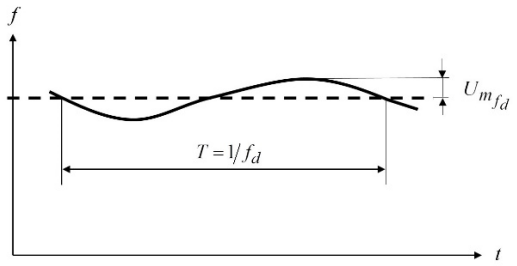


Рис. 2. Джиттер как вариация частоты принимаемого сигнала

В этом случае основными параметрами джиттера становятся его амплитуда $U_{m_{f_d}}$ и частота f_d. Такое рассмотрение получило широкое практическое применение в методиках измерений и в технологии анализа результатов (вариация фазы напрямую связана с вариацией частоты).

Фазовое дрожание обусловлено процессами мультиплексирования и регенерации (регулярный джиттер), а также аддитивными помехами (нерегулярный джиттер). Регулярный джиттер может быть частично скомпенсирован аппаратно-программным способом. Нерегулярный джиттер некомпенсируем, но тот и другой могут с течением времени возрастать, что в конечном счете приводит к сбоям, а то и к отказам цифровых каналов. Джиттер – это аналоговый сигнал, он может принимать бесконечный ряд значений в диапазоне измерения, что важно для решения задач прогнозирования.

Различают при $f_d > 10$ Гц – это фазовое дрожание (или джиттер), а при $f_d \le 10$ Гц – это дрейф фазы (или вандер). Джиттер приводит к нарушению тактовой синхронизации (появляются битовые ошибки), вандер приводит к проскальзыванию в цикловой синхронизации (теряются целые пакеты информации).

В соответствии с приказом Министерства связи Российской Федерации №92 от 10.08.1996 года «Об утверждении Норм на электрические параметры основных цифровых каналов …» измерение джиттера и вандера входит в обязательные эксплуатационные измерения цифровых каналов и трактов [5]. Нормы на показатели дрожания и дрейфа фазы включают в себя сетевые предельные нормы на иерархических стыках, предельные нормы на фазовое дрожание цифрового оборудования и нормы для фазового дрожания цифровых участков (см. рис. 1). Приказом предписано руководствоваться Нормами при вводе в эксплуатацию и при техническом обслуживании цифровых каналов и трактов магистральной и внутризоновых первичных сетей взаимоувязанной сети связи Российской Федерации.

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016 прогнозирование – это многофакторный анализ признаков неисправностей с целью оценки изменения состояния объекта в будущие моменты времени и минимального периода его безаварийной эксплуатации [6]. Кроме выделенных выше трех параметров бинарного цифрового канала (BIT, BER и ES) и пяти аналоговых параметров (остаточное затухание (усиление), мощность передатчика, коэффициент шума приемника, джиттер и вандер) многофакторность предлагается ввести еще и по трем уровням уведомления по каждому параметру. Рассмотрим такие уровни уведомления для выходной мощности передатчика радиорелейной станции (РРСт) (рис. 3).

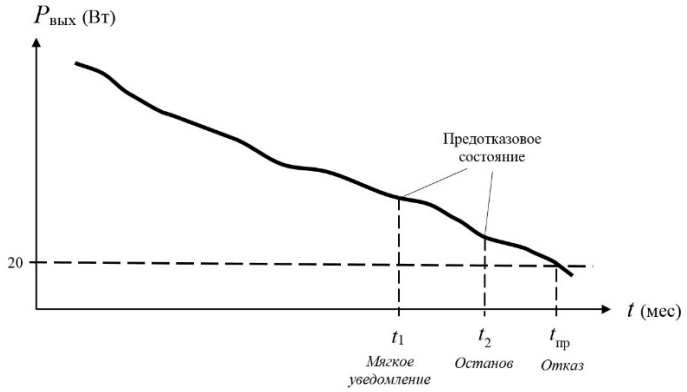


Рис. 3. Три уровня уведомления для монотонно падающей мощности передатчика РРСт

Третий уровень уведомления: минимально допустимое значение параметра или граница области допустимых значений, после которой объект становится неработоспособным (*отказ*), уже задан в технической (эксплуатационной) документации на РЭА или канал связи. Для выходной мощности передатчика РРСт (см. рис. 3) минимально допустимое значение $P_{\text{мин.доп}} \geq 20$ Вт. Первые два уровня уведомления (*Мягкое уведомление* и *Останов*, см. рис. 3) – это еще не отказ, а приближение к нему, предлагается задать экспертным методом. Например, момент времени «*Останова*» предлагается назначить, когда мощность передатчика РРСт уменьшится до 22 Вт (или, когда остаточный ресурс контролируемого объекта израсходуется на 95 %). Момент времени «*Мягкое уведомление*» предлагается назначить, когда мощность передатчика РРСт уменьшится до 23 Вт (или, когда остаточный ресурс контролируемого объекта израсходуется на 92,5 %). Это позволит предотвратить выход контролируемого объекта из строя до планируемого очередного ТО.

Такой многофакторный анализ позволит проследить взаимосвязи между событиями и условиями возникновения постепенных, а в некоторых случаях даже внезапных отказов.

В соответствии с ГОСТом по прогнозированию технического состояния [6] очень важным является правильный выбор аналитической модели постепенного отказа – квазидетерминированного (КД) экстраполяционного тренда контролируемого параметра.

Задача выбора конкретной функциональной зависимости, отражающей реальный процесс изменения параметров ЦСП, не относится к классу строго формализуемых задач, так как один и тот же процесс дрейфа параметра на заданном временном интервале с одинаковой точностью может быть описан несколькими аналитическими выражениями [7]. Для повышения точности экстраполяции параметров ЦСП (при выполнении условий, указанных выше) разработан алгоритм и программа ЭВМ выбора и использования оптимальной КД-модели для прогнозирования технического состояния контролируемых элементов ЦСП (рис. 4).

Исходными данными (для каждого контролируемого параметра П) являются результаты периодического измерения параметра $\Pi(t),\ i=\overline{1,p-1}$ при $p \geq 3$, допустимые пределы его изменения $\Pi_{\text{доп}}$, а также база математических моделей монотонного дрейфа определяющего параметра во времени $\Pi(t)$, которая содержит степенные полиномы 1 ÷ 8 степени, экспоненциальную, степенную и логарифмическую функции:

$$\Pi(t) = f_{\text{КД}\ k}(t),\ \ k=\overline{1,11}$$

Как правило, прогнозирование осуществляется при проведении ТО аппаратуры, поэтому на втором шаге алгоритма фиксируем значение параметра $\Pi(t_p)$. Это значение будет являться проверочным при выборе наиболее адекватной математической модели. Выбор оптимальной КД-модели (шаг третий) предлагается осуществить по трем критериям с использованием мажоритарного принципа.

Если два из трех введенных критериев предлагают одну и ту же модель, то эта модель и выбирается в качестве оптимальной [7]. Далее по выбранной модели производится прогнозирование момента времени, когда параметр $\Pi(t)$ может выйти за границу области допустимых значений (шаг четвертый и пятый):

$$\Pi(t_{p+1}) < \Pi_{\text{доп}}$$

Чтобы заранее предупредить о приближении момента отказа ЦСП, рассчитываются моменты времени $t_{\text{пр.1}}$ и $t_{\text{пр.2}}$ *«Мягкое уведомление»* и «*Останов»* (шаг шестой). В алгоритме задана экспертная оценка остаточного ресурса контролируемого параметра, который должен быть израсходован, для «*Мягкого уведомления»* – 92,5 % $\left(\Pi(t_{\text{пр.1}}) < \Pi_{0,925}\right)$, и для момента *«Останова»* на ТО – 95 % $\left(\Pi(t_{\text{пр.2}}) < \Pi_{0,95}\right)$.

На седьмом шаге алгоритма результаты расчетов выводятся на экран монитора или на печать. По этим значениям t_{p+1}, $t_{\text{пр.1}}$ и $t_{\text{пр.2}}$ назначаются интервалы времени, когда необходимо провести ТО (или ремонт) обслуживаемой РЭА до наступления постепенного отказа. По разным определяющим параметрам моменты t_{p+1}, $t_{\text{пр.1}}$ и $t_{\text{пр.2}}$ могут быть различными. Гибкая стратегия ТО будет работать тем эффективнее, чем больше результатов контроля мы заложим в расчет коэффициентов КД-модели. Поэтому очередное ТО с измерением параметров элементов

ЦСП следует проводить исходя из ближайшего прогнозируемого момента постепенного отказа по всем указанным выше определяющим параметрам.

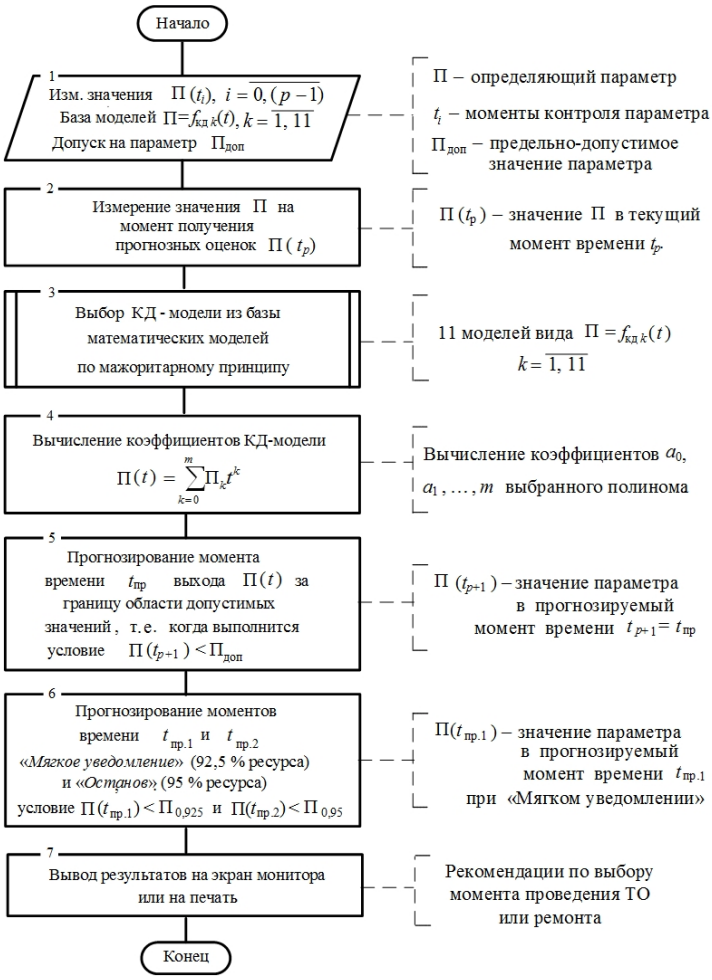


Рис. 4. Алгоритм выбора и использования оптимальной квазидетерминированной модели для прогнозирования технического состояния ЦСП

Таким образом, заявленная цель, состоящая в выборе параметров прогнозирования технического состояния цифровых систем передачи для применения их в перспективной гибкой стратегии ТО достигнута.

1. Проведен анализ параметров, определяющих техническое состояние цифрового канала по отечественным и международным нормативно-правовым документам, в результате которого из 28 контролируемых параметров выбраны 3 основополагающих (первичных).

2. Сделан вывод, что в ЦСП из-за процессов регенерации в пунктах переприема (ретрансляторах) составного канала происходит частичное автоустранение ошибочных битов и, если контролировать сигнал только на выходе цифрового канала, то можно не заметить возникновение скрытого постепенного отказа. Поэтому следует контролировать указанные параметры на выходе каждого участка магистральной первичной сети, это поможет точнее определять техническое состояние объекта в будущие моменты времени и избегать скрытых отказов.

3. Среда распространения сигналов и элементы цифровой аппаратуры по сути имеют аналоговую природу, поэтому кроме чисто цифровых параметров для выявления постепенных отказов следует периодически оценивать и пять предложенных аналоговых параметров линий связи и используемой РЭА.

4. Для предупреждения выхода контролируемого параметра за пределы допустимых значений до планируемого очередного ТО ЦСП предлагается ввести еще один вид многофакторности: два дополнительных уровня уведомления по каждому параметру.

5. Разработан алгоритм выбора (из 11 видов) и использования оптимальной квазидетерминированной модели для прогнозирования технического состояния ЦСП

6. Разработана методика назначения интервалов времени, когда необходимо провести ТО (или ремонт) обслуживаемой ЦСП по нескольким определяющим параметрам с использованием перспективной гибкой стратегии обслуживания и ремонта элементов ЦСП.

Список литературы

1. Рекомендация МСЭ-Т G.821 Показатели качества по ошибкам в международном цифровом соединении, работающем на битовой скорости ниже первичной скорости и образующим часть цифровой сети с интеграцией служб. 2002. – 18 с.

2. Рекомендация ITU-T G.826 Параметры показателей ошибок и нормы между оконечными пунктами для международных цифровых трактов и соединений с постоянной скоростью передач. 2002. 18 с.

3. Рекомендация ITU-T M.2100 Нормы качественных показателей при вводе в эксплуатацию и техническом обслуживании международных трактов и соединений PDH многих операторов. 2003. 50 с.

4. Канаков В.А. Новые технологии измерения в цифровых каналах передачи информации. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Современные системы мобильной цифровой связи, проблемы помехозащищенности и защиты информации». Нижний Новгород, 2006. 91 с.

5. Нормы на электрические параметры основных цифровых каналов и трактов магистральной и внутризоновых первичных сетей ВСС России. Приказ Министерства связи Российской Федерации №92 от 10.08.1996 года, М, 1996. 72 с.

6. ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016 Прогнозирование технического состояния. Общее руководство. М, Стандартинформ, 2017. 24 с.

7. Будников А.В., Ходжаев И.А. Прогнозирование технического состояния радиоэлектронной аппаратуры с использованием полиномиальной модели и сплайн-аппроксимации. Международный научный журнал «СИМВОЛ НАУКИ», №4/2017, в 3-х частях, часть 2, г. Уфа, а/я «ОМЕГА-САЙНС», С. 36-44.

Ходжаев Ильмир Абдуллаевич, канд. техн. наук, доцент, сотрудник, hia205916@gmail.com, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Соловьев Александр Михайлович, канд. техн. наук, сотрудник, solowjevam@mail.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Гудиков Александр Львович, сотрудник, hia205916@gmail.com, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

SELECTION OF PARAMETERS FOR PREDICTION THE TECHNICAL CONDITION OF DIGITAL TRANSMISSION SYSTEMS

I.A. Khodzhaev, A.M. Solovyov, A.L. Gudikov

The article discusses informative defining parameters suitable for predicting the technical condition of digital transmission systems during their operation using flexible maintenance and repair strategies.

Key words: technical condition, informative parameters of digital transmission systems, condition-based maintenance strategy, gradual and sudden failures, prediction algorithm.

Khodzhaev Ilmir Abdullayevich, candidate of technical sciences, docent, employee, hia205916@gmail.com, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Solovyov Alexander Mikhailovich, candidate of technical sciences, employee, solowjevam@mail.ru, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Gudikov Alexander Lvovich, employee, hia205916@gmail.com, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation

УДК 621.396
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-138-139

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО СИГНАЛА, ФОРМИРУЕМОГО АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ С ДИАГРАММООБРАЗУЮЩЕЙ СХЕМОЙ

В.А. Кочетков, А.Е. Черкасов, И.В. Солдатиков

В статье получены аналитические выражения, представляющие пространственно-временной сигнала на основе последовательного учета аналитических выражений и методов решения уравнений электродинамики, определяющих поле преломленной волны радиочастотной линзой, ее преобразование, происходящее на входе и выходе ДОС, а также математическое выражение радиосигнала при распространении к питающим портам АР и на выходе антенной системы.

Ключевые слова: линзовые антенные решетки, линза Ротмана, диаграммообразующая схема.

Непрерывный рост информационного обмена посредством беспроводных телекоммуникационных систем стимулирует развитие мобильных сетей беспроводного доступа, систем беспроводной связи двойного назначения, сетей типа *M2M* (*machine-to-machine*). Широкое использование систем беспроводной связи ставит перед специалистами в области разработки и эксплуатации современных телекоммуникационных систем необходимость решения ряда научных, технологических и практических задач, направленных на повышение устойчивости их функционирования [1].

Разработчики антенной техники и специалисты в области беспроводной связи проявляют значительный интерес к проблемам разработки и совершенствования многолучевых и сканирующих антенных систем (АС). В общем случае, такие антенны представляет собой решетку излучателей и диаграммообразующую схему (ДОС), формирующую в АС требуемые амплитудно-фазовых распределения (АФР) поля электромагнитной волны [1].

Одним из способов формирования и изменения положения диаграммы направленности (ДН) в пространстве и уменьшения массогабаритных показателей многолучевых антенных решеток (АР) является использование в качестве ДОС, наряду с матричными схемами (Батлера, Бласса), волноводных и микрополосковых разновидностей радиочастотных линз [1, с. 280], предложенных, как зарубежными специалистами Ротманом В., Тернером Р.Ф., Хансеном Р.С. [2-4], так и отечественными – Зелкиным Е.Г., Жуком М.С., Молочковым Ю.Б. [5,6]. Такие устройства позволяют создавать практически реализуемые конструкции антенн с одномерной многолучевой и сканирующей ДН, имеют оптимальные характеристики направленности и усиления в пределах требуемой рабочей полосы частот РЭС с АР [1, с.280].

При разработке ДОС линзового типа необходимо исследовать преобразование электромагнитной волны (ЭМВ), осуществляемое:

– при её передаче от источника излучения к ДОС;

– внутри тела линзы и на выходе ДОС;

– в линиях передачи от ДОС к излучателям АР;

– на выходе антенной решетки.

Такое исследование необходимо для анализа основных числовых характеристик (амплитуды и фазы) ЭМВ, так как они определяют параметры антенной решетки и энергетические соотношения на линии беспроводной связи. Трудность решения такой задачи обусловлена различием между симметрией сферической волны, которая возбуждает входные порты ДОС и видом границы раздела, на которую она падает [1, с. 280].

Анализ ДОС на основе плоской линзы Ротмана базируется на законах геометрической оптики, определяющих разложение сферической ЭМВ на парциальные плоские волны, свойства которых хорошо изучены [7-8]. При этом существующие методы расчета АФР поля на выходе ДОС достаточно сложны с позиции выбора способа электродинамического анализа и позволяют получить приближенные значения амплитуды и фазы на выходе ДОС линзового типа [1, с. 280].

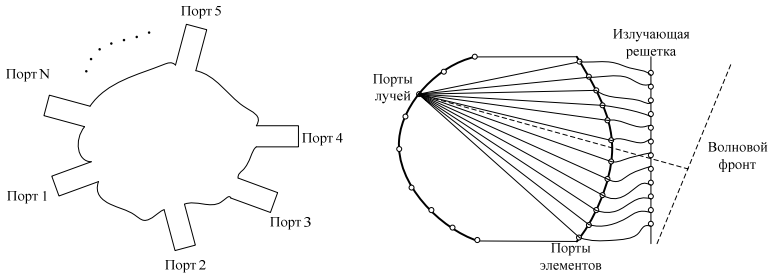
Таким образом, становится очевидным, что повышение помехоустойчивости линий беспроводной связи с АР, реализующими многолучевые ДН, может быть реализовано на основе решения научно-технической задачи по модернизации существующих антенных систем мобильных комплексов беспроводной связи путем структурно-функционального интегрирования в их состав ДОС на основе плоских линз Ротмана [1, с. 280].

Целью статьи является представление модели пространственно-временного сигнала на основе последовательного учета аналитических выражений и методов решения уравнений электродинамики, определяющих поле преломленной волны радиочастотной линзой, ее преобразование, происходящее на входе и выходе ДОС, а также математическое выражение радиосигнала при распространении к питающим портам АР и на выходе антенной системы [1, с. 281, 2].

Исходные данные.

1.На выходе передающего устройства РЭС с АР (тракта) излучается ЭМВ сферического типа.

2.ДОС линзового типа АР представляется в виде СВЧ многополюсника с *N* портами (рис. 1) [1, с. 281].



а) б)

Рис. 1. Диаграммообразующая схема линзового типа в виде: а – СВЧ многополюсника; б – диэлектрической линзы с двумя преломляющими поверхностями

3.Электродинамический анализ осуществляется на основе решения внутренней задачи электродинамики, выполняемого при исследовании интегральных, дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, описывающих процедуры преломления электромагнитного поля внутри тела радиочастотной линзы [1, с. 281].

4.Основу асимптотических приближений при разработке модели пространственно-временного сигнала АС составляют методы геометрической оптики (ГО), вычислительной (технической) электродинамики и физической оптики [1].

Ограничения. Область электродинамического анализа составляет однородная, изотропная среда с параметрами: μ – магнитная проницаемость, σ – удельная проводимость. При решении задачи преломления волны электромагнитное поле (ЭМП) определяется посредством учета векторов напряженности электрического E и магнитного H полей. В рассматриваемой области распространения электромагнитной волны отсутствуют потери.

Допущения. Задача определения ЭМП сводится к определению поля, удовлетворяющего уравнениям Максвелла [1, с. 281]:

$$\nabla \times E = -j\omega B = -j\omega\mu_0[\mu]H, \tag{1}$$

$$\nabla \times H = -j\omega D = -j\omega\varepsilon_0[\varepsilon]E, \tag{2}$$

где $\omega = 2\pi c/\lambda$ – угловая частота; λ – длина волны; c – скорость света в свободном пространстве; $i = \sqrt{-1}$ *;E, H* – напряженность электрического и магнитного поля; *D*, *B* – электрическая и магнитная индукции; ε_0, μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости воздуха [2].

Граничные условия на поверхности раздела сред определяются непрерывностью касательных составляющих *E* и *H* и задаются в виде:

$$\left.\begin{aligned} & n \times E_i = 0, \\ & n \times H_i = 0, \\ & n \cdot B_i = n \cdot \mu_0[\mu_i]H_i = 0, \\ & n \cdot D_i = n \cdot \varepsilon_0[\varepsilon_i]H_i = 0. \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

Представленные ограничения и допущения позволяют учесть влияние среды распространения, источника излучения, профиля преломляющих поверхностей линзы Ротмана, СВЧ-линий передачи между ДОС и АР, геометрию излучающих элементов АР [1, с. 281].

Рассмотрим особенности структуры АС с ДОС на основе линзы Ротмана, а также путь прохождения радиосигнала в таком виде антенн (рис. 2).

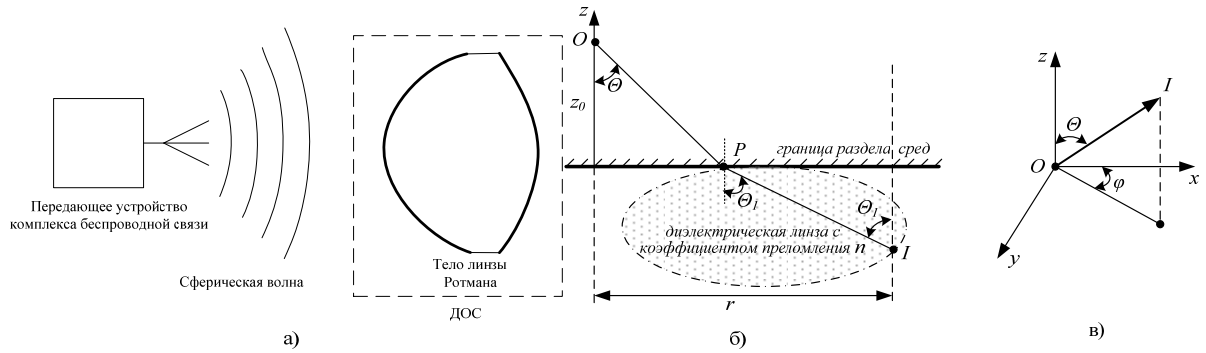


Рис. 2. Геометрия анализируемой области ДОС линзового типа: а – схема распространения сферической волны в системе «вых. ПРД тракта – вход ДОС»; б – падающая и преломленная диэлектрической линзой ЭМВ; в – система координат анализируемой области

На рис. 2 обозначены: O – источник излучения сферической волны; Θ – угол падения сферической волны на границу раздела сред распространения ЭМВ; *P* – точка преломления сферической волны телом линзы; Θl – угол преломления плоской волны на границе раздела сред; *r* – расстояние от начала координат до точки излучения плоской волны на выходе линзы на плоскости *xOy*; *I* – точка излучения плоской волны на выходе линзы; *n* – коэффициент преломления линзы [2].

Представление модели пространственно-временного сигнала на основе аналитических выражений, описывающих процедуры распространения ЭМВ в антенной системе.. В силу возможности представления входного сигнала в виде произведения двух независимых функций, пространственной и временной [9]:

$$S_e(v_x, v_y; t) \cong S_e(t-\tau)\exp(j2\pi Ft)G(v_x, v_y)\exp[j2\pi(v_x u_x + v_y u_y)], \quad (4)$$

где S_e – сигнал, поступающий на вход антенны; $G(v_x, v_y)$ – функция раскрыва антенны; v_x, v_y – углы падения электромагнитной волны на поверхность антенны; $u_x = \cos v_x$; $u_y = \cos v_y$; τ – интервал корреляции сигнала; F - частота сигнала;

для анализа распространения ЭМВ может быть применен принцип факторизации, т. е. представление приемного (передающего) устройства в виде двух последовательно соединенных независимых трактов: пространственного и временного [10].

Для осуществления оптимальной пространственной фильтрации, необходимо раздельно управлять амплитудой и фазой радиосигнала в каждой точке пространственного тракта, а для осуществления временной обработки применять различные схемы оптимальной фильтрации и методы корреляционной обработки сигнала в приемном тракте. Взаимосвязь пространственного и временного трактов обуславливается тем, что комплексная амплитуда сигнала, воспринимаемого элементом *dx* в точке *x* раскрыва пространственного тракта, пропорциональна $G(x)\exp\left(j2\pi x u_x/\lambda\right)\mathrm{d}x$, а полный сигнал, принимаемый раскрывом пространственного тракта с направления u_x, с точностью до постоянного коэффициента *k*, описывается диаграммой направленности [9]:

$$\mathrm{G}(\mathrm{u_X}) = \mathrm{k}\int_{-\mathrm{d}/2}^{\mathrm{d}/2} \mathrm{G}(\mathrm{x})\exp^{\mathrm{j}2\pi \mathrm{x}\mathrm{u_X}/\lambda}\,\mathrm{dx}, \quad (5)$$

в общем случае комплексной.

Поскольку радиосигнал может быть представлен комплексной огибающей и ее комплексным спектром, связанными между собой преобразованием Фурье, то и апертуру пространственного тракта можно записать в виде комплексной диаграммой направленности $G(u_x)$ и ее углового спектра $G(v_x)$ – функцией раскрыва, которые также связаны преобразованием Фурье [11].

Таким образом, возникает задача исследования антенных систем с целью построения на их основе оптимальных пространственно-временных фильтров, используемых для обработки радиосигналов.

Для построения алгоритма обработки пространсственного-временного сигнала (ПВС) необходимо получить априорные сведения о возможностях АС по его формированию и обработке с точки зрения числовых значений параметров пространственно-временного фильтра. Известно [12], что любой сигнал на оси времени можно представить набором парциальных плоских волн. При этом существуют понятия фазовой и групповой скорости распространения волн. Скорость передачи энергии зависит от групповой скорости $V_{гр} = \frac{d\omega}{dk} = \upsilon_{ф} - \lambda \cdot \frac{d\upsilon}{d\lambda}$, т. е. скорости группы плоских волн при дисперсии равной нулю. Выражение для определения напряженности электрического поля имеет вид [11]:

$$E \approx 2E_m \cdot \frac{\sin[\left(\frac{d\omega}{dk}t - z\right)\Delta k]}{\frac{d\omega}{dk}t - z} \cdot \cos(\omega t - kz), \tag{6}$$

откуда следует, что поле группы волн имеет характер модулированной гармонической волны с огибающей, описываемой функцией вида:

$$S(z,\ t) = \frac{\sin[\left(\frac{d\omega}{dk}t - \mathrm{z}\right)\Delta k]}{\frac{d\omega}{dk}t - \mathrm{z}}. \tag{7}$$

Фазовая скорость $\upsilon_{ф} = \frac{\omega}{k}$, определяемая волновым числом k в аргументе косинуса выражения (7), показывает с какой быстротой смещается вдоль оси z «несущая косинусоида» внутри огибающей. Это не скорость распространения сигнала: последний характеризуется огибающей, и необходимо исследовать ее изменение во времени и пространстве. Максимум огибающей радиосигнала $S_{ax} = \Delta k$, имеет место при

$$\frac{d\omega}{dk}t - z = 0. \tag{8}$$

Условие (8) выполняется при разных координатах z в различные моменты времени t. Скорость движения огибающей, или групповую скорость $\mathrm{V_{гр}}$, можно получить, вычислив из (8) производную dz/dt:

$$V_{гр} = \frac{dz}{dt} = \frac{d\omega}{dt}. \tag{9}$$

Таким образом, для одновременного управления амплитудой и фазой сигнала по пространству и времени, необходимо иметь значения изменений координаты z, времени t, в течение которого данное изменение происходит, и групповой скорости распространения $V_{гр}$. Следовательно, для разработки оптимальных пространственно-временных фильтров в антенне необходимо учитывать:

1. переменную координату z;
2. изменение времени t;
3. переменное значение ω.

Конструкция антенной системы позволяет получить переменное значение z, а изменение частоты ω и времени t должно быть сопряжено с изменением z таким образом, чтобы получить максимум огибающей сигнала, т. е. максимум группового времени распространения.

Излучение плоской АР прямоугольной формы с расположением излучателей в плоскости $z = 0$ представлено на рис.3.

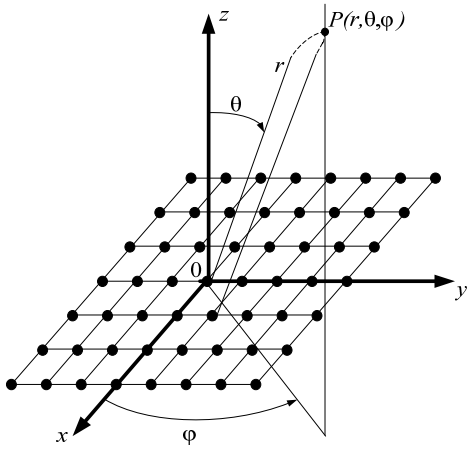


Рис.3. Система плоской антенной решетки

Пространственный сигнал плоской АР определяется путем суммирования полей отдельных излучателей АР:

$$f(\Theta,\varphi) = \sum_{n=1}^{N_x}\sum_{m=1}^{N_y} F_n(\Theta,\varphi)e^{-ik(x_{nm}\sin\Theta\cos\varphi + y_{nm}\sin\Theta\sin\varphi)}, \tag{10}$$

где $F_n(\Theta,\varphi)$ – нормированная ДН излучателя решетки, N – количество излучателей в решетке, $x_{n,m}, y_{n,m}$ – координаты n-го излучателя в решетке, k – волновое число.

Известно [12], что структура сигнала в дальней зоне антенны относительно начала координат может быть записана в виде:

$$S_c(t,r) = A_c U(t) e^{i\psi(t)} e^{i(\omega_0 t + kr)} = S_0(t) e^{i(\omega_0 t + kr)}, \tag{11}$$

где $S_0(t) = A_c U(t) e^{i\psi(t)}$, $A_c(t)$ – амплитуда сигнала в рассматриваемой точке, $U(t)$ – нормированный закон модуляции амплитуды, $\psi(t)$ – закон угловой модуляции, ω_0 – несущая частота, r – расстояние до точки наблюдения.

В режиме приема (рис.3), время распространения плоской волны t_p от некоторой точки $P(x,y,z)$ до начала системы координат $t_p=R/c$, где c – скорость распространения электромагнитной энергии в свободном пространстве.

Перепишем выражение для сигнала в произвольной точке на раскрыве АР

$$S_c(t-t_p,r) = S_0(t-t_p) e^{i\left[\omega_0(t-t_p)+kr\right]}. \tag{12}$$

Рассмотрим этапы прохождения радиосигнала от передающего устройства к антенне (рис. 4).

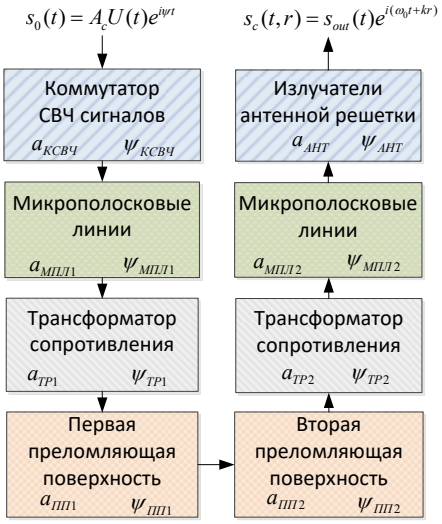


Рис. 4. Структура прохождения сигнала от передающего устройства к излучателям антенной решетки

Радиосигнал при распространении с выхода передающего устройства РЭС к антенне проходит ряд элементов [13]:

– коммутатор СВЧ сигналов;

– микрополосковые линии от коммутатора СВЧ сигналов к трансформаторам сопротивления портов линзы и от трансформаторов к излучателям антенной решетки;

– трансформаторы сопротивления портов на первой и второй преломляющей поверхностях линзы;

– первую и вторую преломляющие поверхности линзы Ротмана;

– излучатели антенной решетки.

Тогда выражение (12) для пространственно-временного сигнала на выходе АР принимает вид:

$$s_c(t-t_p,r) = s_{out}(t-t_p) e^{i(\omega 0(t-t_p)+kr)} \tag{13}$$

где

$$s_{out}(t) = A_{out} U(t) e^{i\psi_{out} t}, \tag{14}$$

$$A_{out} = (A_c - a_{КСВЧ} - a_{МПЛ1} - a_{ТР1} - a_{ПП1} - a_{ПП2} - a_{ТР2} - a_{МПЛ2} - a_{АНТ}) \tag{15}$$

$$\psi_{out} = (\psi + \psi_{КСВЧ} + \psi_{МПЛ1} + \psi_{ТР1} + \psi_{ПП1} + \psi_{ПП2} + \psi_{ТР2} + \psi_{МПЛ2} + \psi_{АНТ}) \tag{16}$$

A_c –амплитуда сигнала передающего устройства; $a_{СКВЧ} = 0{,}23$ дБ на частоте 5,8 ГГЦ – потери в коммутаторе СВЧ сигналов; $a_{МПП1}, a_{МПП2} = 1{,}5$дБ/м на частоте 5,8 ГГЦ потери в микрополосковой линии от коммутатора СВЧ сигналов до трансформаторов сопротивления первой преломляющей поверхности и от второй преломляющей поверхности до излучателей АР; $a_{ТР1}$, $a_{ТР2} = 1{,}5$дБ/м на частоте 5,8 ГГц – потери в трансформаторе сопротивления на первой и второй преломляющей поверхности линзы; $a_{ПП1} = Re(A(\Theta)_{out1})$ – потери на первой преломляющей поверхности линзы; $a_{ПП2} = Re(\Psi(\Theta)_{out1})$ – потери на второй преломляющей поверхности линзы; $a_{АНТ}$ – потери в антенной решетке; ψ –закон угловой модуляции; $\psi_{КСВЧ} = 1{,}09$ рад – изменение фазы в коммутаторе СВЧ сигналов; $\psi_{МПЛ1}, \psi_{МПЛ2} = \pi/2$ – изменение фазы в микрополосковой линии от коммутатора СВЧ сигналов до трансформаторов сопротивления первой преломляющей поверхности и от второй преломляющей поверхности до входа антенной решетки; $\psi_{ТР1}, \psi_{ТР2} = \pi/2$ – изменение фазы в трансформаторе сопротивления на первой и второй преломляющей поверхности; $\psi_{ПП1} = Im(A(\Theta)_{out1})$ –изменение фазы на первой преломляющей поверхности; $\psi_{ПП2} = Im(\Psi(\Theta)_{out2})$ –изменение фазы на второй преломляющей поверхности; $\psi_{АНТ}$ –изменение фазы в антенной

решетке.

Таким образом математическая модель пространственно-временного сигнала на выходе АР с ДОС может быть записана в виде

$$S_c(t,r,\Theta,\varphi) = s_{out}(t-t_p)e^{i(\omega_0(t-t_p)+kr)}\sum_{n=1}^{N_x}\sum_{m=1}^{N_y}F_n(\Theta,\varphi)e^{-ik(x_{nm}\sin\Theta\cos\varphi+y_{nm}\sin\Theta\sin\varphi)}. \quad (17)$$

Временными параметрами ПВС являются значения мощности, частоты и начальной фазы сигнала Пространственными параметрами являются законы изменения фазы напряженности поля по апертуре антенны, определяемые азимутальным и угломестным положением точки наблюдения [14].

Такая форма записи позволяет говорить о возможности раздельной пространственной и временной обработки ПВС, что будет учитываться при разработке алгоритма его обработки. Обычно в результате пространственной обработки сигнала формируется приемная диаграмма направленности антенны, а затем осуществляется временная обработка сигнала в приемном тракте РЭС. Возможен и обратный порядок: вначале производится временная обработка, а затем формирование ДН в апертуре антенны [11].

Точность полученных значений параметров ПВС зависит от адекватности разработанной модели. Решение физических задач численными методами, как правило, связано с рядом математических приближений. Перевод математических формул в вычислительные алгоритмы оказывается достаточно сложным. Перечисленные обстоятельства приводят к необходимости использования методов контроля вычислений, чтобы обеспечить корректность и точность полученных решений. Для этих целей применялись следующие методы проверки адекватности представленной модели: принцип взаимности, проверка сходимости, сравнение с результатами, полученными другими методами, выполнение граничных условий и подтверждение на основе результатов компьютерного эксперимента [1, с. 287].

Адекватность разработанной модели проверялась путем сравнения результатов, полученных электродинамическим методом – методом конечных элементов. Так в работах [15, 16] представлены постановка решаемой задачи методом конечных элементов и окончательные результаты. Значения, полученные в результате моделирования, соответствуют данным, полученным в ходе применения такого метода [1, с. 288.

Заключение. Получены аналитические выражения, представляющие ПВС на выходе АР на основе последовательного учета этапов его распространения и методов решения уравнений электродинамики, определяющих поле преломленной волны радиочастотной линзой на основе уточнения геометро-оптических приближений.

Для реализации процедур управления многолучевой ДН АР в дальнейшем предлагается разработать алгоритм обработки пространственно-временного сигнала антенной системой с ДОС линзового типа.

Список литературы

1. Черкасов А.Е. Математическая модель пространственного сигнала в антенной решетке с диаграммообразующей схемой линзового типа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2022. Выпуск 2. С. 280-289.

2. Анализ поля преломленной волны в диэлектрических линзах диаграммообразующих схем антенных решеток РЭС СВЧ-, КВЧ-диапазона на основе интегрального уравнения и метода конечных элементов / Н.В. Шишкин [и др.] // Техника радиосвязи. 2020. Вып. 1 (44). С. 86-103.

3. Виноградов, А. Ю. Устройства СВЧ и малогабаритные антенны: учеб. пособие для вузов / А. Ю. Виноградов, Р. В. Кабетов, А. М. Сомов; под ред. А.М. Сомова. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 440 с.

4. W. Rotman and R. F. Turner, “Wide angle microwave lens for line source applications,” IEEE Trans. Antennas Propag. AP-11, 1963. P. 623–632, November 1963.

5. Исследование диаграммообразующих устройств многолучевых антенных решеток на основе плоской линзы Ротмана / Д.Ю. Крюков, Ю.С. Курьян, Ю.Г. Пастернак // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т.10. № 3-1. С. 63-65.

6. Зелкин Е. Г., Петрова Р. А. Линзовые антенны. М.: Сов. Радио, 1974. 280 с.

7. Жук М.С., Молочкой Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. М.: Энергия, 1973. 440 с.

8. Самохин А.Б. Интегральные уравнения электродинамики трехмерных структур и итерационные методы их решения (обзор) // Радиотехника и электроника. 1993. Том 38. Вып. 8. С. 1345–1369.

9. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки: 2-е изд. М.: Техносфера, 2012. 560 с.

10. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем. М.: «Радио и связь», 1987.

11. Перфильев В.В. Разработка СВЧ-устройств с использованием методов геометрической оптики: диссертация на соискание ученой степени к.т.н. М.: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2013. 206 с.

12. Черкасов А.Е. Пространственно-временной сигнал на выходе диаграммообразующей схемы линзового типа антенной решетки РЭС СВЧ-диапазона. // Сборник статей VI международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки и образования». Петрозаводск, 2021. С. 175-181.

13. Бенесон Л.С., Журавлёв В.А., Попов С.В., Постнов Г.А. Антенные решётки / Под ред. Бенесона, Л.С. М.: Сов.радио, 1966, 368 с.

14. Ерохин Г.А., Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: Учебник для вузов / Г.А. Ерохин, О.В. Чернышев, Н.Д. Козырев, В.Г. Кочержевский; Под ред. Г.А. Ерохина. 3-е изд. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 491 с.

15. Y. Gao, M. Khaliel, F. Zheng, T. Kaiser, Rotman lens based hybrid analog–digital beamforming in massive MIMO systems: Array architectures, beam selection algorithms and experiments. IEEE Trans. Veh. Technol.66(10), 2017. P. 9134–9148.

16. Возможность применения метода конечных элементов для электродинамического анализа диэлектрических линз как элементов диаграммообразующих схем антенных решеток РЭС СВЧ и КВЧ диапазонов/ В. А. Кочетков [и др.] // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2019. Вып. 10.

С. 172–180.

Кочетков Вячеслав Анатольевич, канд. тех. наук, доцент, сотрудник, cherkasov532@yandex.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Черкасов Александр Евгеньевич, сотрудник, cherkasov532@yandex.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации,

Солдатиков Игорь Викторович, сотрудник, cherkasov532@yandex.ru, Россия, Орел, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации

MATHEMATICAL MODEL OF THE SPACE-TIME SIGNAL GENERATED BY THE ANTENNA ARRAY WITH A DIAGRAM-FORMING SCHEME

V.A. Kochetkov, A.E. Cherkasov, I.V. Soldatikov

In the article, analytical expressions representing the space-time signal are obtained on the basis of sequential accounting of analytical expressions and methods for solving electrodynamic equations that determine the field of the refracted wave by a radio frequency lens, its transformation occurring at the input and output of the DOS, as well as the mathematical expression of the radio signal when propagating to the supply ports of the AP and at the output of the antenna system.

Key words: lens antenna arrays, Rotman lens, diagram-forming scheme.

Kochetkov Vyacheslav Anatolyevich, candidate of technical sciences, docent, employee, cherkasov532@yandex.ru, Russia, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Cherkasov Alexander Evgenievich, employee, cherkasov532@yandex.ru, Russia, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation,

Soldatikov Igor Viktorovich, employee, cherkasov532@yandex.ru, Russia, Russia, Orel, Academy of the Federal Security Service of the Russian Federation

УДК 681.7
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-144-145

МЕТОД КОНТРОЛЯ, АНАЛИЗИРУЮЩИЙ РАСХОДИМОСТЬ В ИССЛЕДОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ АГЕНТОВ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Е.Е. Майоров, А.В. Арефьев, Р.Б. Гулиев, В.П. Пушкина, Г.А. Цыганкова

Используя метод контроля, анализирующий расходимость светового излучения отраженного от исследуемой поверхности получены результаты взаимодействия внешних агентов с биологическими объектами. Для научных исследований расширяются функциональные возможности оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, повышаются информативные содержания измерений, наблюдаются тенденции широкого применения как в производственных, так и в научных направлениях, поэтому для контроля взаимодействия светового излучения с веществом данное исследование актуально и перспективно. В статье поставлена задача и определены объекты и метод исследования. В работе приведены внешний вид и оптическая схема экспериментальной установки. Получены экспериментальные результаты измерений поверхности кожного покрова без обработки и после нанесения кремов разных марок в результате усреднения измерений в 5000 точках поверхности участка кожи размером 2мм х 2мм.

Ключевые слова: светоделительная пластинка, устройство поперечного сдвига, оптическая схема, коэффициент отражения, крем, поверхность кожного покрова, геометрическая оптика.

Современные оптические методы контроля геометрических параметров отражающих поверхностей охватывают широкий диапазон измерений: от десятых и сотых долей микрометра до 10^6 мкм [1, 2]. Существуют оптических методов контроля поверхности, которые определяются основной характеристикой светового излучения, такой как временная когерентность [3, 4]. Эти методы делятся на высококогерентные методы, методы геометрической оптики и методы, использующие излучение с ограниченной временной когерентностью [5, 6].

Методы контроля рельефа поверхности, использующие принципы геометрической оптики, получили широкое распространение на практике. Простота эксплуатации, съема информации и интерпретации результатов обеспечили реализацию указанных методов в различных приборах [7, 8].

Оптические методы измерений рельефа поверхности и работа соответствующих приборов основаны на анализе светового излучения, отраженного от контролируемой поверхности [9, 10].

В научно-технической литературе на высоком уровне представлены теоретический анализ и их функционирование, решены вопросы построения и эксплуатационных характеристик этих приборов и комплексов. Для научных исследований расширяются функциональные возможности этих приборов и комплексов, повышаются информативные содержания измерений, наблюдаются тенденции широкого применения как в производственных, так и в научных направлениях [11, 12].

Поэтому представляет интерес применение метода геометрической оптике для анализа биологической поверхности при воздействии на неё различных внешних агентов.

Целью работы является использование метода контроля, анализирующего расходимость в исследовании биологических объектов.

Постановка задачи. В работе необходимо провести измерения диффузно отражающей поверхности обработанной кремом для рук отечественного производства. Определить отражательную способность биологической поверхности до и после обработки кремом.

Метод и объекты исследования. В качестве объектов исследования были участки поверхности кожи (2мм х 2мм) до и после нанесения крема. Исследовалось взаимодействие крема для рук «Лаванда», «Ландыш», «Роза» в области предплечья, где роговой слой кожи наиболее тонкий.

Крем для рук «Лаванда» создан на основе экстракта лаванды. Основной компонент этого крема оказывает антисептическое и успокаивающее действие на кожу рук, повышая её упругость и эластичность. Витамин Е и D-пантенол восполняют недостаток витаминов, укрепляют ногти на руках и смягчают кожу. Бисаболол и аллантоин снимают раздражение и успокаивают кожу, способствуя заживлению трещинок.

Крем для рук «Ландыш» создан на основе экстракта лилии. Основной компонент этого крема увлажняет, питает и освежает кожу рук, придавая поверхности кожного покрова эффект белизны.

Крем для рук «Роза» создан на основе экстракта розы. Основной компонент этого крема обладает восстанавливающим действием, питает и разглаживает кожу рук, делая её ровной, бархатистой и однотонной.

Для оценки кривизны волнового фронта отраженной волны и получения зависимостей коэффициента отражения от смещения в поперечном направлении (ось *OX*) использовалась экспериментальная установка, внешний вид которой представлен на рисунке 1.

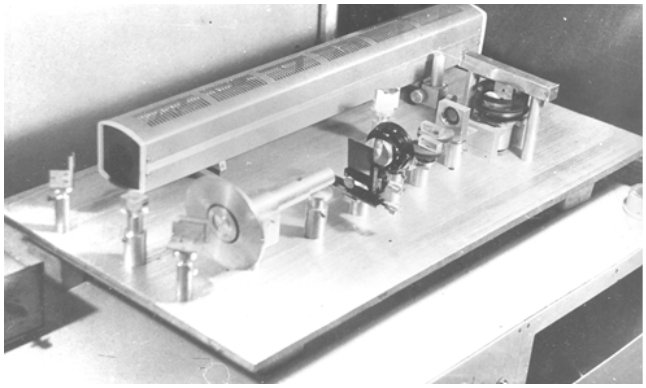


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

В работе проводился анализ методом сдвигового дублирования рассеянной волны с последующей интерференцией двух волновых фронтов. Схема реализации изложенного принципа представлена на рисунке 2.

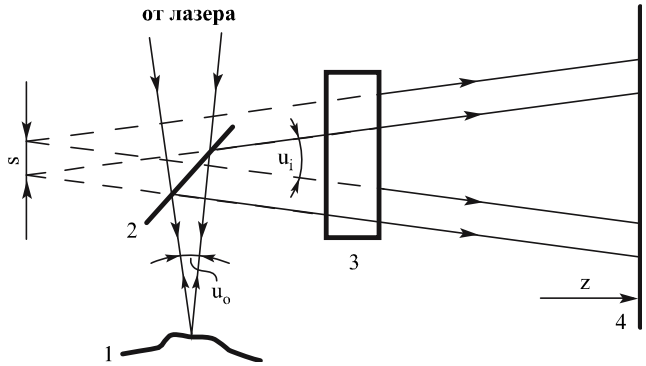


Рис. 2. Оптическая схема контроля поверхности объекта методом анализа расходимости отраженного излучения: 1 – биологическая поверхность; 2 – светоделительная пластинка; 3 – устройство поперечного сдвига; 4 – плоскость наблюдения

Для контроля биологической поверхности 1 использовали суперлюминесцентный диод (Nolatech, работающий на длине волны 790 нм, мщностью 5 мВт). Устройство поперечного сдвига 3 формирует две идентичные волны, смещенные относительно друг друга в поперечном направлении на величину *s*. В области перекрытия волновые фронты интерферируют с образованием системы интерференционных полос [13, 14]. В плоскости наблюдения, отстоящей от поверхности объекта на расстоянии *z*, шаг полос p_i определяется выражением

$$p_i = \lambda z / s \,, \tag{1}$$

где λ – длина волны излучения.

При смещении контролируемой поверхности изменяется *z*, и, в соответствии с (1), шаг полос p_i. Измеряя шаг, из (1) определяют искомую величину *z*.

Как следует из формулы (1), рассмотренная система обладает умеренной чувствительностью. Так, при расстоянии до объекта *z* = 100 мм, изменение рельефа на величинуΔz = 0,1 мм приводит к изменению шага полос p_i на 0,1%.

Для повышения точности измерений предложено использовать технику гетеродинной интерферометрии, позволяющей производить измерение фазы интерференционных полос с точностью до $2\pi/\left(10^3-10^4\right)$ рад.

При наличии двух фотоприемников в плоскости наблюдения, разнесенных на расстояние S', фазовый сдвиг интерференционных полос ϕ связан с искомым расстоянием до объекта z следующей формулой:

$$\varphi = \frac{2\pi s S'}{\lambda z}.$$

Показано, что измерение рельефа диффузно отражающей поверхности можно производить с точностью **δz,** определяемой экспериментальной установкой следующим выражением:

$$\delta z = \frac{\lambda}{2\sin u_i \sin u_o},$$

где u_o – апертурный угол освещения; u_i – апертурный угол наблюдения.

Итак, обеспечения точности измерений $\delta z < 30$ мкм для λ = 790 нм, необходимо, чтобы $\sin u_o > 0{,}2$.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Анализируемый участок поверхности (область предплечья, где роговой слой кожи наиболее тонкий) зондировался по нормали. Крем наносится на поверхность предплечья. Экспериментальные результаты измерений показаны на рисунке 3. Крем наносится на поверхность предплечья одного и того же пациента в разные промежутки времени. Измерения поверхности кожного покрова проводились без обработки и после нанесения кремов разных марок. Представленные экспериментальные зависимости получены в результате усреднения измерений в 5000 точках поверхности участка кожи размером 2мм х 2мм.

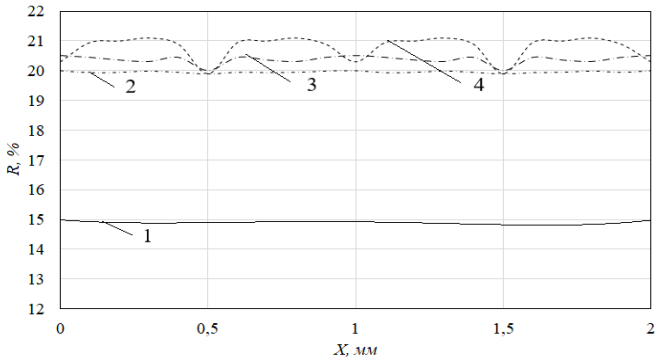


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента отражения (R) от контролируемых поверхностей в поперечном направлении: 1 – без обработки кремом; 2 – «Лаванда»; 3 – «Ландыш»; 4 – «Роза»

Как видно из рисунка 3 при обработке внешними агентами кожного покрова коэффициент отражения увеличился. Видимо это связано с химическим составом кремов. Из рисунка 3 видно, что кривые распределения не имеют явных всплесков, что доказывает хорошую сбалансированность и правильно подобранный химический состав кремов.

Заключение. В работе не ставилась задача проверки правильности химического состава внешних агентов. В работе получены спектральные зависимости коэффициента отражения от контролируемых поверхностей в поперечном направлении до и после взаимодействия кожного покрова с кремами. Измерения микрорельефа кожного покрова, проведенные через определенные промежутки времени, позволяют анализировать изменения кожи, а также исследовать влияние различных косметологических процедур на состояние поверхности кожного покрова Экспериментальные результаты представляют интерес для косметологических исследований, а также для оптического приборостроения.

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. Пентин Ю.А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. М.: Мир. 2006. 683 с.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука. 1976. 926 с.
5. Малакара Д. Оптический производственный контроль: пер. с англ. под ред. Соснова А.Н. М.: Машиностроение. 1985. 340 с.
6. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра. 1968. 263 с.
7. Майоров Е.Е., Бородянский Ю.М., Р.Б. Гулиев Р.Б., А.В. Дагаев А.В., Курлов В.В., Таюрская И.С. Исследование оптических поверхностей плосковыпуклых линз экспериментальной интерференционной установкой с дифрагированным опорным волновым фронтом // Научное приборостроение. 2023. Т.33. № 1. С. 43-53.
8. Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Бородянский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Пушкина В. П. Математическое моделирование выходного сигнала при разной геометрии апертур фотоприемников интерференционной системы анализа интерферограмм // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 4. С. 313-319. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-313-319.
9. Майоров Е.Е. Исследование выходного интерференционного сигнала в фазоизмерительной системе // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Четвертая Всероссийская научная конфе-

ренция (СПб., 18-22 апреля 2023 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 56-60.

10. Майоров Е.Е. К вопросу о погрешности измерений в сдвиговой интерферометрии // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Четвертая Всероссийская научная конференция (СПб., 18-22 апреля 2023 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 61-64.

11. Майоров Е.Е. Исследование сложных форм поверхностей когерентно ограниченной во времени системой // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Четвертая Всероссийская научная конференция (СПб., 18-22 апреля 2023 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 65-68.

12. Майоров Е.Е., Костин Г.А., Черняк Т.А. Реализация метода спекл-фотографии для контроля диффузно отражающих поверхностей объектов // Научное приборостроение. 2023. Т. 33. № 2. С. 75–83.

13. Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Экспериментальная измерительная система для контроля поверхностей корпуса воздушного судна // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 5. С. 430-436. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-430-436.

14. Майоров Е.Е., Черняк Т.А., Костин Г.А. Применение высокочувствительных фотоматериалов на основе галогенидов серебра для исследования влияния отклонений подложек спеклограмм на результаты измерений // Приборы. 2023. № 5. (275). С. 51-54.

Майоров Евгений Евгеньевич, канд. тех. наук, доцент, majorov_ee@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Арефьев Александр Владимирович, канд. физ.-мат. наук, aaref@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП),

Гулиев Рамиз Балахан оглы, канд. техн. наук, ramiz63@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),

Цыганкова Галина Александровна, канд. физ.-мат. наук, преподаватель, galusinka@mail.ru, Россия, Пушкин, Военно-морской политехнический институт

A CONTROL METHOD THAT ANALYZES DIVERGENCE IN THE STUDY OF THE INTERACTION OF EXTERNAL AGENTS WITH BIOLOGICAL OBJECTS

E.E. Maiorov, A.V. Arefiev, R.B. Guliyev, V.P. Pushkina, G.A. Tsygankova

Using a control method analyzing the divergence of light radiation reflected from the surface under study, the results of the interaction of external agents with biological objects were obtained. For scientific research, the functionality of optical and optoelectronic devices and complexes is expanding, the informative content of measurements is increasing, there were trends in widespread use both in production and in scientific directions, therefore, this study was relevant and promising for controlling the interaction of light radiation with matter. The article sets the task and defines the objects and method of research were set. The paper the appearance and optical scheme of the experimental setup were presented. Experimental results of measurements of the skin surface without treatment and after applying creams of different brands as a result of averaging measurements at 5000 points on the surface of a skin area measuring 2mm x 2mm were obtained.

Key words: beam-splitting plate, transverse shear device, optical scheme, reflection coefficient, cream, skin surface, geometric optics.

Maiorov Evgeny Evgenievich, candidate of technical sciences, docent, majorov_ee@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Arefiev Alexander Vladimirovich, candidate of physical and mathematical sciences, aaref@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (GUAP),

Guliyev Ramiz Balahan oglu, candidate of technical sciences, ramiz63@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),

Tsygankova Galina Aleksandrovna, candidate of physical and mathematical sciences, teacher, galusinka@mail.ru, Russia, Pushkin, Naval Polytechnic Institute

УДК 531.57; 623.53
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-148-149

ПРИМЕНЕНИЕ ПОПРАВОЧНЫХ ФОРМУЛ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ ПРИ РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗООБРАЗОВАНИЕМ АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВЫСТРЕЛА

И.А. Подкопаев, А.В. Подкопаев, В.И. Должиков

Представлены приемы уточнения вырожденной задачи управления процессом преобразования энергии порохов прогрессивной формы в энергию пороховых газов (далее – газы), базирующиеся на компенсации погрешностей геометрического закона горения порохов поправками, сформированными результатами многолетних исследований отечественных и зарубежных ученых. Осуществлена проверка достоверности, показаны преимущества заявленного подхода.

Ключевые слова: быстрота газообразования, характеристики формы пороха, прогрессивное и дегрессивное горение, фазы горения пороха.

Предметная область внутренней баллистики ставит перед собой задачи, решение которых позволяет получать важные для практики выводы и оптимизировать процессы управления артиллерийским выстрелом (далее – выстрел). Точность решения внутрибаллистических задач и практическая ценность полученных результатов определяют, в конечном итоге, теоретический и экспериментальный уровни артиллерийской науки. Успехи актуализации многообразных методов решения основной задачи внутренней баллистики [1–6] систематизированы в публикации [7] и применены в статье [8].

Управление процессом выстрела предполагает регулировку притока газов при горении заряда. При этом первостепенное значение имеют: количество образовавшихся газов, быстрота (интенсивность) газообразования, секундный весовой приток газов и в конечном итоге – количество энергии, выделяемое зарядом в единицу времени.

И количество газов, и интенсивность их образования зависят от формы и размеров пороховых зерен – характеристик формы пороха χ, λ, μ и относительной толщины пороха z. Указанные характеристики оказывают непосредственное влияние на относительную часть сгоревшего пороха ψ. Если обозначить через ω вес заряда, кг, то текущее количество сгоревшего пороха, превращающегося в газы, будет $\omega\psi$ кг. В свою очередь, быстрота газообразования представляется величиной относительной части пороха, сгоревшего в единицу времени $d\psi/dt$. Анализ этой величины позволяет установить механизмы регулирования скорости притока газов при горении пороха по нижеприведенным зависимостям.

Секундный весовой приток газов выражается известной величиной $\omega\dfrac{d\psi}{dt}$, а количество энергии, выделяемое весом заряда ω в единицу времени горения пороха силой f, характеризуется произведением $f\omega\dfrac{d\psi}{dt}$. Именно величина $f\omega\dfrac{d\psi}{dt}$ определяет характер нарастания давления газов в канале артиллерийского ствола (далее – ствол) при выстреле. Так как значения величин f и ω постоянны, то знания о влиянии форма пороха на быстроту газообразования $d\psi/dt$, включающие совокупность сведений о характеристиках пороха, закономерностях процессов, протекающих в пороховом зерне при газообразовании и правилах использования выходной информации, следует отнести к стратегическим знаниям об исследуемом явлении.

Значения относительной части сгоревшего пороха ψ в функции относительной толщины пороха z должны быть известны на предварительном и первом периодах выстрела. Наряду с функцией относительной части сгоревшего пороха ψ, задается относительная поверхность пороха σ, также зависящая от относительной толщины пороха z.

Изменение относительной толщины пороха в процессе горения заряда выражается формулой:

$$z = e / e_1, \tag{1}$$

где e – толщина свода пороха, м; e_1– половина толщины пороха, м.

Основные характеристики порохов приводятся в специальных справочниках или приложениях учебной литературы, например, [1, 2].

Сложность моделируемого процесса и недостаточно достоверные знания отдельных явлений, совершающихся при горении пороха, обусловливают введение в большинстве случаев, в том числе, в работах [4–8], допущения о геометрическом законе горении порохов. Физический закон в отличие от геометрического закона горения порохов является более сложным и по сути экспериментальным. И хотя для современных быстродействующих вычислителей прирост времени счета незначителен, для оперирования физическим законом горения порохов необходима представительная статистическая выборка опытных кривых по результатам испытаний в манометрической бомбе и стрельб.

Для всех форм порохов, производных от ленты, и для трубчатых порохов геометрический закон горения устанавливает связь относительной части сгоревшего пороха ψ с относительной толщиной пороха z через трехчленную зависимость одного и того же вида:

$$\psi = \chi z(1 + \lambda z + \mu z^2). \tag{2}$$

В формуле (2) характеристики формы пороха вычисляются по простым геометрическим соотношениям:

$$\chi = \frac{2\Pi + Q}{Q}\beta, \tag{3}$$

где Π и Q – характеристики относительного уменьшения, соответственно, ширины и длины пороха за время горения; β – характеристика растянутости пороха по его длине $2c$ ($\beta = 2e_1/2c$).

$$\lambda = \frac{\xi - 1 - 2\Pi}{2\Pi + Q}\beta, \tag{4}$$

где ξ – число каналов пороха.

$$\mu = -\frac{\xi - 1}{2\Pi + Q}\beta^2. \tag{5}$$

При заданных значениях диаметра пороха D_0 и диаметра канала пороха d_0, характеристики относительного уменьшения размеров пороха при горении рассчитываются в формулах (3) – (5) как:

– отношение периметра сечения порохового бруска к периметру окружности, построенной на длине $2c$, как на диаметре:

$$\Pi = \frac{\pi(D_0 + \xi d_0)}{\pi 2c} = \frac{D_0 + \xi d_0}{2c};$$

– отношение площади поперечного сечения порохового зерна с каналами к площади круга того же диаметра $2c$:

$$Q = \frac{\frac{\pi}{4}\left(D_0^2 - \xi d_0^2\right)}{\frac{\pi}{4}(2c)^2} = \frac{D_0^2 - \xi d_0^2}{(2c)^2}.$$

Практикой установлены следующие соотношения размеров [1–3]: диаметр канала пороха $d_0 = e_1$; диаметр пороха $D_0 = 3d_0 + 4 \cdot 2e_1 = 11d_0 = 11e_1$; длина пороха $2c = (2 – 2{,}5)D_0$.

Зависимость относительной поверхности σ от относительной толщины z пороха устанавливается также геометрическим законом горения через трехчленную зависимость следующего вида:

$$\sigma = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2. \tag{6}$$

Для получения дополнительной зависимости равенство (2) продифференцировано по величине z:

$$d\psi/dz = \chi(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2). \tag{7}$$

Вспомогательная зависимость, выражающая закон горения пороха, получена подстановкой формулы (6) в формулу (7):

$$d\psi/dz = \chi\sigma. \tag{8}$$

Геометрический закон горения, установленный для порохов дегрессивной формы $\left(\frac{d\sigma}{dt} < 0\right)$, например, лента или пластина, несомненно, не полностью отвечает действительности в сравнении с описанием механизма горения многоканальных порохов прогрессивной формы $\left(\frac{d\sigma}{dt} > 0\right)$ физическим законом горения. В некоторых случаях наблюдаются отклонения в горении многоканальных порохов прогрессивной формы от геометрического закона горения, так как в узких каналах порохового зерна создаются особые условия неравномерного горения внутри каналов и на наружной поверхности. При горении пороха со многими каналами наблюдается распад зерна и продолжение горения – явления, которое по природе отсутствует в дегрессивных порохах с одним каналом или без каналов. Флегматизованные пороха с неравномерным распределением флегматизатора по толщине зерна труднее воспламеняются и горят с переменной скоростью горения пороха. Однородность структуры наружных слоев у пироксилиновых порохов нарушается при вымочке в процессе их изготовления, поэтому скорость горения пороха в этом случае меняется по более сложному закону.

Некоторые погрешности допущения о геометрическом законе горения порохов восполнены поправками, полученными в трудах [1–3] в результате многолетних исследований в области внутренней баллистики. Исследования показывают, что семиканальные пороха в баллистическом отношении равноценны трубчатым, то есть при стрельбе из одного и того же артиллерийского орудия равные по весу заряды из трубчатого и семиканального порохов сообщают снарядам одинакового веса при одинаковой величине максимального давления газов в канале ствола примерно одинаковую дульную скорость. Равные значения максимального давления газов в канале ствола достигаются при соотношении толщин пороховых зерен:

$$(2e_1)_\text{с} \approx 0{,}7(2e_1)_\text{т}, \tag{9}$$

где индексы «с» и «т» в обозначениях толщины пороха $2e_1$ относятся к семиканальному и трубчатому порохам, соответственно.

Толщина порохового зерна семиканального пороха $(2e_1)_\text{с}$, эквивалентному ленточному составляет

$$(2e_1)_\text{с} \approx 0{,}75(2e_1)_\text{л}, \tag{10}$$

где индекс «л» в обозначении толщины пороха $2e_1$ относится к ленточному пороху.

Проверка адекватности и действенности разработанной математической модели внутрикаморного горения проведена на основе установления связи между геометрией пороха и образованием газов, заданной базисом вида (1) – (8) и дополненной поправками вида (9) и (10). В качестве опорного образца метательного вещества принят штатный порох, применяемый для снаряжения унитарного и наиболее распространенного патрона с осколочно-фугасно-зажигательным снарядом ОФЗ-30 [9].

Лист прогрессивности и график зависимости относительной поверхности σ от относительной части ψ сгоревшего семиканального пороха 6/7 Фл представлены на рис. 1 и рис. 2, соответственно.

Горение исследуемого пороха распадается на две фазы, как представлено на рис. 1 и рис. 2: первая фаза – прогрессивное горение до распада зерна (графически – до резкого изменения характера кривых на рис. 1, рис. 2); вторая фаза – дегрессивное горение после распада зерна (графически – после резкого изменения характера кривых на рис. 1, рис. 2). В первой фазе относительная толщина пороха меняется от 0 до $z_s = 1$, относительная часть сгорев-

шего пороха от 0 до ψ_s = 0,848 (остальные 15,2% горят дегрессивно), горение идет с возрастанием относительной поверхности пороха до σ_s = 1,341. Во второй фазе относительная толщина пороха увеличивается от z_s =1 до $z_k \approx$ 1,532 (пропорционально толщине элементов распада 0,532e_1), относительная часть сгоревшего пороха повышается от ψ_s = 0,848 до ψ_k = 1, относительная поверхность пороха убывает до нуля σ_k = 0.

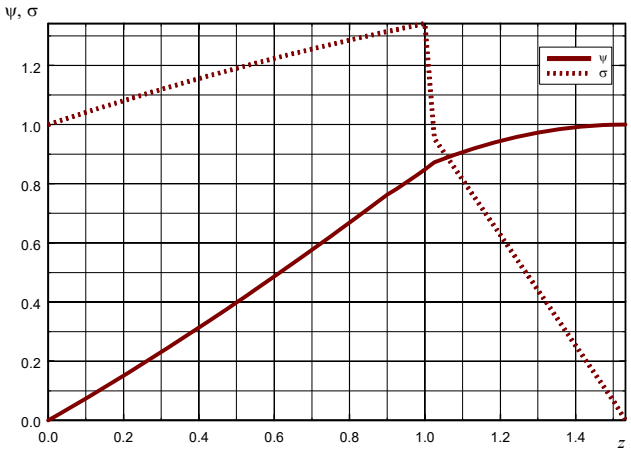


Рис. 1. Зависимости относительной части и относительной поверхности от относительной толщины сгоревшего семиканального пороха 6/7 Фл

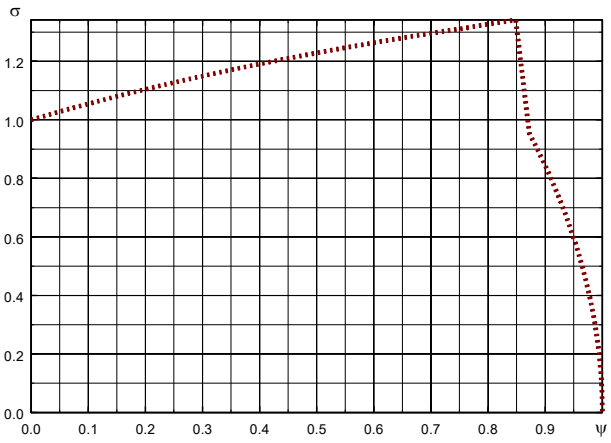


Рис. 2. Зависимость относительной поверхности от относительной части сгоревшего семиканального пороха 6/7 Фл

Следует отметить, что вследствие технологических допусков на толщину свода e и неодновременного воспламенения всех поверхностей пороха, распад происходит не строго в один и тот же момент при идеальных значениях относительной части ψ_s = 0,850 и относительной поверхности σ_s = 1,370 сгоревшего пороха [1–3], а постепенно. В начале процесса газообразования сгорает наименьшая толщина сводов, затем сгорают более толстые элементы. Одновременно начинается процесс догорания частей уже образовавшихся продуктов распада, и происходит наложение процессов горения до и после распада пороховых зерен. Распад фактически получается «расплывчатым» и протекает в некоторых пределах изменения относительной части $0{,}750 \le \psi_s \le 0{,}850$ и относительной поверхности $1{,}370 \le \sigma_s \le 1{,}440$ сгоревшего пороха. Контрольными значениями исследуемых параметров в момент распада неизменно принимаются величины ψ_s = 0,850 и σ_s = 1,370, то есть в качестве наиболее приемлемых вариантов рассматриваются решения, в которых достоверно реализуется схема горения пороха параллельными слоями.

Полученные здесь результаты развивают механизмы описания горения порохов, в которых значения относительной части и относительной поверхности сгоревшего пороха составляют ψ_s = 0,835 и σ_s = 1,440, соответственно. В сравнении с данными настоящей работы, наблюдается повышение точности моделирования процесса притока газов по значениям относительной части сгоревшего пороха на 1,8% и по значениям относительной поверхности сгоревшего пороха на 3%, что считается успешным при описании малоизученного быстропротекающего процесса горения пороха.

Повышению точностных свойств предлагаемой математической модели газообразования при выстреле способствовало введение поправочных формул вида (9) и (10) на геометрию пороха.

Кривая $\psi(z)$, построенная на рис. 1 выходит из начала координат и заканчивается в точке z_1 = 1. Характер наклона кривой определяется быстротой газообразования $d\psi/dt$

$$\mathrm{tg}\gamma = \frac{d\psi}{dt} = \chi\sigma.$$

Здесь элемент времени dt соответствует приращению относительной части сгоревшего пороха ψ на величину $d\psi$, непосредственно влияющей на интенсивность газообразования в данный момент времени t.

В точке $z_{1s} = 1$, $\psi = \psi_S$, кривая $\psi(z)$ имеет излом, и тангенс ее наклона меняется скачком от $\mathrm{tg}\gamma_s$ до $\mathrm{tg}\gamma_k$.

Анализ рис. 1 и рис. 2 убедительно свидетельствует о том, что чем больше относительная поверхность в функциях относительной толщины $\sigma(z)$ и относительной части $\sigma(\psi)$ сгоревшего пороха, тем большее количество газов образуется в единицу времени и тем интенсивнее идет горение. Так, при $\sigma_s = 1{,}109$ $\psi_s = 0{,}210$, а при $\sigma_s = 1{,}293$ $\psi_s = 0{,}692$. По достижению максимума относительной поверхности пороха (момента распада зерна) при $\sigma_s = 1{,}341$, $\psi_s = 0{,}848$. После распада относительная поверхность пороха убывает до $\sigma_k = 0$, при этом относительная часть сгоревшего пороха ψ_k изменяется значительно медленнее ($0{,}872 < \psi_k \leq 1$) – горение резко дегрессивное.

Отнесение процесса распада порохового зерна к значениям относительной части сгоревшего пороха $\psi_s = 0{,}848 \approx 0{,}850$ и относительной поверхности пороха $\sigma_s = 1{,}341 \approx 1{,}370$ соответствует объективному смещению конца горения пороха к дульному срезу ствола, что, естественно оказывает положительное влияние на решение основной задачи внутренней баллистики в целом.

Одним из путей дальнейшего совершенствования процессов управления выстрелом в плане обоснования оптимальных условий заряжания можно считать меры, направленные на уменьшение относительного объема продуктов распада пороха. К таким мерам, отрабатываемым в настоящее время путем проведения численных экспериментов, относятся: повышение прогрессивности пороха σ_s, создание условий более позднего распада увеличением относительной части сгоревшего пороха на первой фазе горения ψ_s и уменьшением относительной толщины продуктов распада во второй фазе горения z_{1k}.

Включение предложенных локализаций в традиционные схемы моделирования внутрикаморных процессов не исключает дальнейшую доработку темы с позиций физического закона горения порохов.

Список литературы

1. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.

2. Проектирование ракетных и ствольных систем / под ред. Б.В. Орлова. М.: Машиностроение, 1974. 828 с.

3. Миропольский Ф.П., Морозов А.А., Пырьев Е.В. Баллистика авиационных средств поражения. Ч. 1. Внутренняя баллистика ствольных систем и ракетные двигатели твердого топлива / под ред. Ф.П. Миропольского. М.: Изд-во ВВИА имени проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 255 с.

4. Кувшинов В.М., Сергеев В.В., Дубнер М.И. Работы в области внутренней баллистики отечественных малокалиберных средств вооружения // Боеприпасы. 1995. №5-6. С. 28 – 32.

5. Семенов И.В., Уткин П.С., Ахмедьянов И.Ф. Применение многопроцессорной вычислительной техники для решения задач внутренней баллистики // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. С. 183 – 193.

6. Пушкарев А.М., Вольф И.Г., Ихтисанов И.И. Исследование теплового состояния стволов оружия и влияния его на начальную скорость снаряда // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 11. С. 26 – 31.

7. Анализ актуальных достижений в решении основной задачи внутренней баллистики / И.А. Подкопаев, А.Б. Бабаджанов, А.В. Подкопаев, В.И. Должиков // Авиационное вооружение: сб. науч. ст. IX межвуз. науч.-практ. конф. «Молодежные чтения памяти Ю.А. Гагарина» (17-19 мая 2022 г.) // ВУНЦ ВВС «ВВА». Воронеж, 2022. С. 27 – 32.

8. Комбинированная математическая модель внутренней и промежуточной баллистики авиационного артиллерийского оружия / А.Б. Бабаджанов, И.А. Подкопаев, А.В. Подкопаев, В.И. Должиков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 4. С. 177 – 185.

9. 30 мм патрон с беспламенным порохом с осколочно-фугасно-зажигательным снарядом и взрывателем АГ-30Д к пушке ГШ-6-30. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1984. 24 с.

Подкопаев Илья Александрович, адъюнкт, ilya.podkopaev.96@bk.ru, Россия, Воронеж, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,

Подкопаев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доц., профессор, aleksanpodkopaev@mail.ru, Россия, Воронеж, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,

Должиков Василий Иванович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры, Link707@mail.ru, Россия, Воронеж, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

APPLICATION OF CORRECTION FORMULAS FOR INTERNAL BALLISTICS IN CALCULATION OF THE GAS FORMATION CONTROL PARAMETERS OF AN ARTILLERY SHOT

I.A. Podkopaev, A.V. Podkopaev, V.I. Dolzhikov

Methods for refining the degenerate problem of controlling the process of converting the energy of progressive form powders into the energy of powder gases (hereinafter referred to as gases) are presented, based on the compensation of errors in the geometric law of combustion of powders by corrections formed by the results of many years of research by domestic and foreign scientists. The validity check is carried out, the advantages of the claimed approach are shown.

Key words: rate of gas formation, characteristics of the form of gunpowder, progressive and degressive combustion, phases of combustion of gunpowder.

Podkopaev Ilya Aleksandrovich, adjunct, ilya.podkopaev.96@bk.ru, Russia, Voronezh, Air Force academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin,

Podkopaev Aleksandr Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, professor, aleksanpodkopaev@mail.ru, Russia, Voronezh, Air Force academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin,

Dolzhikov Vasily Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, head of chair, Link707@mail.ru, Russia, Voronezh, Air Force academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin

УДК 519.8
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-152-153

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНО РЕЗУЛЬТАТИВНЫХ ПРОЛЕТОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НАД РАЙОНОМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ ПРИРОДНОГО ИЛИ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА

Е.П. Минаков, М.А. Александров, А.В. Мищеряков

В статье рассматриваются характеристики применения орбитальных группировок космических аппаратов над районам возникновения чрезвычайных ситуаций на поверхности Земли. Приведены модель определения границ наклонных проекций районов возникновения чрезвычайных ситуаций на поверхности Земли и модель расчета вероятности потенциально результативных пролетов космического аппарата над этими районом.

Ключевые слова: космический аппарат, вероятность потенциального результативного пролета.

Введение. Исследование информации о чрезвычайных ситуациях (ЧС) природного и техногенного характера, позволяет сделать вывод, что своевременное обнаружение возникновения и определения очага стихийного бедствия позволяют значительно предотвращать их дальнейшее распространение и снижать последствия, представляющие существенную угрозу для безопасности граждан, экономики страны и, как следствие, для устойчивого развития Российской Федерации. Предлагается широкомасштабное использование орбитальных группировок (ОГ) космических аппаратов (КА) различного целевого предназначения для мониторинга районов вероятного возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, что делает необходимым поиск путей оценивания эффективности их применения над заданным районам вероятного возникновения (РВВ) ЧС. В условиях априорной неопределенности времени начала применения, времен включения бортовой аппаратуры (БА) и характеристик применения ОГ КА по заданному РВВ ЧС показательными становятся оценки вероятностей пролета этих средств над РВВ ЧС на заданном интервале времени.

Основными характеристиками применения ОГ КА по заданному РВВ ЧС являются:

1) вероятность потенциально результативных пролетов КА над РВВ ЧС в любой момент времени;

2) осредненное время пролета заданного количества КА над РВВ ЧС;

3) осредненное время, когда над РВВ ЧС не пролетает ни одно КА.

Это делает актуальным разработку и апробацию модели расчета вероятности потенциально результативных пролетов КА над РВВ ЧС в любой момент времени.

Постановка задачи. Пусть считаются заданными:

1) ГМТ границы РВВ ЧС – $\{(\psi_k, \lambda_k)\}$, где ψ_k – геоцентрическая широта, λ_k – геоцентрическая долгота k-й точки, $k = \overline{1,K}$ – номер точки (требование равномерности расположения точек отсутствует);

2) интервал времени оценивания вероятности применения ОГ КА по РВВ ЧС – ΔT (начало применения ОГ КА по заданному РВВ ЧС не определено, является случайным);

3) КА, по каждому из которых известен вектор баллистических и технических характеристик – $B_j = \langle m_j, a_j, e_j, i_j, \omega_j, \gamma_j, \alpha_j \rangle$, $j = \overline{1,n}$, где m_j, – идентификатор (номер) j-го КА, a_j – большая полуось, e_j – относительный эксцентриситет, i_j – наклонение орбиты, L_{0j} – долгота пролета ОГ КА восходящего узла орбиты на начальном витке, t_{0j} – соответствующее время, ω_j – аргумент широты перигея, γ_j – угол полураствора зоны обзора бортовой специальной аппаратуры j-го КА, α_j – предельный угол ее отклонения по углу крена.

В нынешних условиях к решению задач в РВВ ЧС предлагается привлекать КА гражданские и двойного назначения, принадлежащие коммерческим организациям и различным странам. Пусть известно общее количество таких КА – n. В условиях случайности момента времени начала применения ОГ КА по РВВ ЧС к случайным факторам могут быть отнесены долготы и моменты времен пролетов ими восходящих узлов орбит на витках применений по РВВ ЧС – $t^*_j : 0 \le t^*_j \le \Delta T$.

Помимо этого, случайным фактором применения каждого j-го КА ДЗЗ по РВВ ЧС является ориентация оси визирования БА по углу крена – $\alpha^*_j : 0 \le \alpha^*_j \le \alpha_j$. Этот случайный фактор может быть учтен за счет соответствующего увеличения размеров зон видимости КА.

Считается, что пролет ОГ КА над РВВ ЧС является потенциально результативным, если полоса его обзора покрывает хотя бы часть РВВ ЧС.

Требуется оценить вероятность потенциально результативных пролетов заданной ОГ КА над заданным РВВ ЧС в любой момент времени, на заданном интервале времени оценивания вероятности применения ОГ КА – P_n.

Для решения поставленной задачи введем ряд допущений:

1) время начала применения ОГ КА – t^* распределено случайным образом равномерно на интервале ΔT;

2) угол ориентации оси визирования БА каждого КА ОГ в ходе разового применения постоянен и распределен равномерно от 0 до α_j;

3) случайные события пространственного и временного пролетов ОГ КА над РВВ ЧС – независимы;

4) события пролета над РВВ ЧС на восходящих и нисходящих ветвях траектории – независимы;

5) движение КА моделируется в рамках кеплеровой теории;

6) модель поверхности Земли – сфера;

7) освещенность РВВ ЧС Солнцем не учитывается.

В рамках сделанных допущений вероятность потенциально результативного пролета j-го КА над РВВ ЧС на одном витке может быть оценена по формуле [1]:

$$P_{Bj} = P_{1j} \cdot P_{2j}, \tag{1}$$

где P_{1j} – вероятность «пространственного пролета» над РВВ ЧС; P_{2j} – вероятность «временного пролета» над РВВ ЧС.

Для j-го КА вероятность «пространственного пролета» над РВВ ЧС может быть оценена геометрическим способом [1] по формуле:

$$P_{1j} = \left(\Delta\lambda_{Bj} + \Delta\lambda_H\right)/(2 \cdot \pi), \tag{2}$$

где $\Delta\lambda_{Bj} = \lambda_{Bj}^{П} - \lambda_{Bj}^{Л}$ – угловой размер наклонной проекции РВВ ЧС для восходящей ветви траектории j-го КА; $\lambda_{Bj}^{Л}$ – долгота левой границы наклонной проекции РВВ ЧС для восходящей ветви траектории j-го КА; $\lambda_{Bj}^{П}$ – долгота правой границы наклонной проекции РВВ ЧС для восходящей ветви траектории j-го КА; $\Delta\lambda_{Hj} = \lambda_{Hj}^{П} - \lambda_{Hj}^{Л}$ – угловой размер наклонной проекции РВВ ЧС для нисходящей ветви траектории j-го КА; $\lambda_{Hj}^{Л}$ – долгота левой границы наклонной проекции РВВ ЧС для нисходящей ветви траектории j-го КА; $\lambda_{Hj}^{П}$ – долгота правой границы наклонной проекции РВВ ЧС для нисходящей ветви траектории j-го КА.

Под наклонной проекцией точки границы РВВ ЧС понимается точка пересечения дуги экватора плоскостью орбиты КА с учетом вращения Земли вокруг своей оси за время движения КА до этой точки.

Под наклонной проекцией РВВ ЧС понимается дуга экватора Земли между крайними точками, получающимися в результате пересечения дуги экватора плоскостью орбиты КА, касающейся границы РВВ ЧС с учетом угловых размеров зон видимости КА в этих точках и вращения Земли вокруг своей оси.

Для j-го КА вероятность «временного пролета» над РВВ ЧС может быть оценена геометрическим способом по формуле

$$P_{2j} = \Delta t_{cp}{}^{B}{}_{j} / T_j, \tag{3}$$

где $\Delta t_{cp}{}^{B}{}_{j}$ – осредненное время пролета j-го КА над РВВ ЧС на одном витке; T_j – период j-го КА [2]:

$$T_j = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{a_j{}^3 / K_з}; \tag{4}$$

$K_з$ = 398600,44 км^3/с^2 – гравитационная постоянная Земли.

Осредненное время пролета j-го КА над РВВ ЧС на восходящих ветвях траектории определяется по формуле

$$\Delta t_{cp}{}^{B}{}_{j} = 1/\Delta t_{Bj} \cdot \int_{\lambda_{Bj}^{П}}^{\lambda_{Bj}^{Л}} t\left(\lambda_{Bj}; B_j\right) d\lambda_{Bj}, \tag{5}$$

где $\Delta t_{Bj} = t_{Bj}\left(\lambda_{Bj}^{Л}\right) - t_{Bj}\left(\lambda_{Bj}^{П}\right)$.

Следует отметить, что поиск осредненных времен пролетов КА над РВВ ЧС сложной конфигурации в случае их эллиптических орбит представляет собой непростую задачу. Однако, при аппроксимации РВВ ЧС «простыми» фигурами – сферическими треугольниками (или их комбинациями) для круговых орбит КА (или для участков траекторий, близких к круговым) оценивание этого времени носит прозрачный характер.

В рамках сделанной постановки задачи должна оцениваться вероятность пролета каждого КА хотя бы над частью РВВ ЧС, что соответствует «наружнему» касанию их полосами обзора РВВ ЧС (рис.1).

За отводимое время – ΔT j-ое ОГ КА выполнит $N_{Пj}$ витков (пессимистическая оценка), оцениваемое по формуле

$$n_j = E[\Delta T / T_j] + 1, \tag{6}$$

где $E[\cdot]$ – символ операции выделения целой части числа.

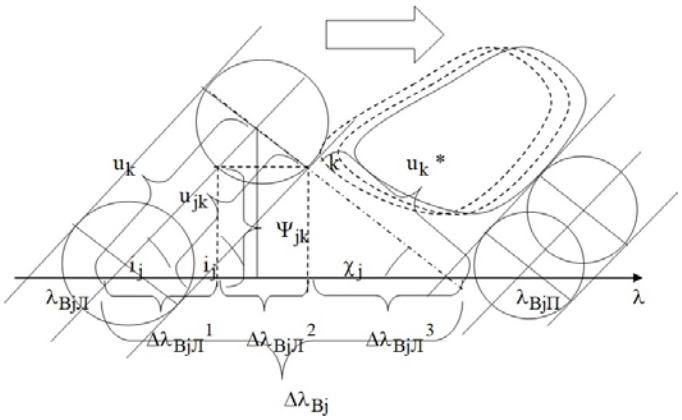


Рис. 1. «Наружнее» касание полос обзора КА РВВ ЧС (плоское изображение)

Вероятность пролета j-го КА над РВВ ЧС хотя бы на восходящей или нисходящей ветвях траектории хотя бы на одном витке на интервале времени ΔT может быть оценена по формуле

$$P_{nj} = 1 - (1 - P_{Bj})^{nj}. \tag{7}$$

Вероятность пролета хотя бы одного КА из ОГ, состоящей из m КА, над РВВ ЧС – P_m может быть оценена по формуле

$$P_m = 1 - \prod_{i=1}^{m} (1 - P_{nj}). \tag{8}$$

Формула позволяет оценивать величину вероятности пролета хотя бы одного КА из заданной ОГ над РВВ ЧС в любой момент на заданном интервале времени ΔT.

Из формулы видно, что $P_m = 1$ только при $m = \infty$. Поскольку всегда $m << \infty$ то это означает, что всегда существуют разрывы в пролетах КА над РВВ ЧС.

Модель определения границ наклонных проекций РВВ ЧС. Для определения величин $\Delta\lambda_{Bj}$, $\Delta\lambda_H$ необходимо рассчитать аргумент широты точки касания полосы обзора j-го КА k-й точки РВВ ЧС – u_{jk} по правилу Непера с использованием соответствующего пятиугольника [3] (рис.2):

$$\sin u_{jk} = \sin \psi_k / \sin i_j. \tag{9}$$

По правилу Непера с помощью этого же пятиугольника можно рассчитать величину дуги $\Delta\lambda_{BjЛ}^{1}$ (рис.1), используя следующую формулу:

$$\sin \Delta\lambda_{BjЛ}^{1} = \operatorname{ctg} i_j \cdot \operatorname{tg} \psi_k. \tag{10}$$

Радиус орбиты j-го КА, соответствующего указанной точки касания полосой обзора РВВ ЧС в точке k, и радиус его орбиты в восходящем узле орбиты определяются по уравнению траектории [4]:

$$r(u_{jk}) = a_j \cdot (1 - e_j^2) / (1 + e_j \cdot \cos(u_{jk} - \omega_j)); \tag{11}$$

$$r(u_j = 0) = a_j \cdot (1 - e_j^2) / (1 + e_j \cdot \cos \omega_j). \tag{12}$$

Вычисление половины углового размера полосы обзора j-го КА в восходящем узле орбиты α_j (рис.3) может быть осуществлено по формуле:

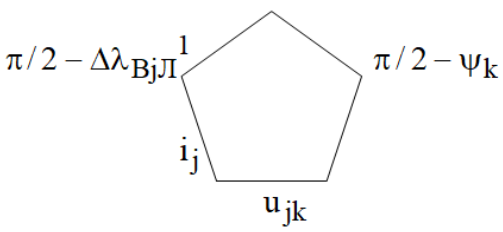


Рис. 2. Пятиугольник Непера для определения аргумента широты точки касания полосы обзора КА точки РВВ ЧС

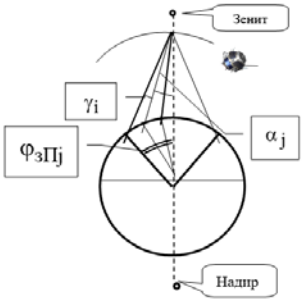


Рис. 3. Угловой размер полосы обзора КА в восходящем узле орбиты (плоское изображение)

$$\varphi_{зПj}\left(r\left(u_j=0\right),\gamma_j,\alpha_j\right)=\pi/2-\left(\alpha_j+\gamma_j\right)-\arccos\left(r\left(u_j=0\right)/R_з\cdot\sin\left(\alpha_j+\gamma_j\right)\right). \quad (12)$$

Вычисление половины углового размера полосы обзора j-го КА в k-й точке РВВ ЧС может быть произведено по этой же формуле:

$$\varphi_{зПj}\left(r\left(u_{jk}\right),\gamma_j,\alpha_j\right)=\pi/2-\left(\alpha_j+\gamma_j\right)-\arccos\left(r\left(u_{jk}\right)/R_з\cdot\sin\left(\alpha_j+\gamma_j\right)\right). \quad (13)$$

Угол между плоскостью, нормальной к плоскости орбиты j-го КА и проходящей через точку k, и плоскостью экватора Земли – χ_j (рис.1) определяется по правилу Непера (рис.4)

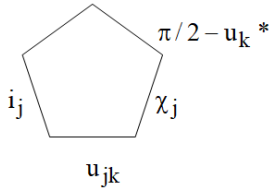


Рис. 4. Пятиугольник Непера для определения угла между плоскостью, нормальной к плоскости орбиты КА и проходящей через точку k, и плоскостью экватора Земли

$$tg\chi_j=ctgi_j/\cos u_{jk}. \quad (14)$$

Дуга в этой плоскости между экватором Земли и точкой $k-u_k{}^*$ (рис.1) может быть рассчитана с использованием того же пятиугольника

$$\cos u_k{}^*=\cos i_j/\sin\chi_j. \quad (15)$$

Угол касания полосой обзора j-го КА РВВ ЧС в точке $k-\psi_{jk}$ (рис.1) вычисляется по правилу Непера (рис.5)

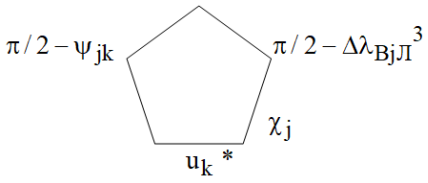


Рис. 5. Пятиугольник Непера для определения угла касания полосой обзора КА РВВ ЧС в точке k

$$\sin\psi_{jk}=\sin\chi_j\cdot\sin u_k{}^*. \quad (16)$$

Угол в плоскости экватора Земли $\Delta\lambda_{BjЛ}{}^3$ определяется по тому же пятиугольнику по формуле

$$\cos\Delta\lambda_{BjЛ}{}^3=\cos u_k{}^*/\cos\psi_{jk}. \quad (17)$$

Величина угла между направлением на восходящий узел орбиты j-го КА и линией пересечения экватора Земли плоскостью, нормальной к плоскости орбиты j-го КА и проходящей через точку k, $\Delta\lambda_{Bj}$ (рис.1) рассчитывается по формуле по правилу Непера (рис.6)

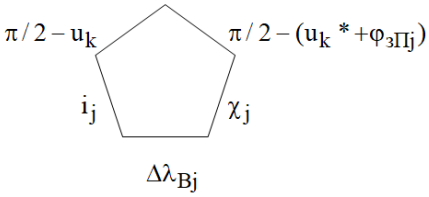


Рис. 6. Пятиугольник Непера для определения $\Delta\lambda_{Bj}$

$$\cos\Delta\lambda_{Bj} = \mathrm{ctgi}_j \cdot \mathrm{ctg}\chi_j. \quad (18)$$

Угол между линией пересечения меридианом точки k экватора Земли и направлением на точку наклонной проекции точки k без учета вращения Земли определяется по формуле

$$\Delta_{Bj} = \Delta\lambda_{Bj} - \Delta\lambda_{BjЛ}{}^{3}. \quad (19)$$

Аргумент широты подспутниковой точки j-го КА, зона обзора которой касается РВВ ЧС в точке k, рассчитывается в соответствии с зависимостью по правилу Непера (рис.5)

$$\sin u_k = \mathrm{ctgi}_j \cdot \mathrm{tg}\left(u_k * + \varphi_{зПj}\right). \quad (20)$$

Эксцентрическая аномалия этой же точки – E_{kj} определяется как [5]

$$\mathrm{tg}E_{kj}/2 = \sqrt{((1-e_j)/(1+e_j))} \cdot \mathrm{tg}\left(u_k - \omega_j\right)/2. \quad (21)$$

Эксцентрическая аномалия точки на этой дуге, расположенной на экваторе Земли, вычисляется по аналогичной формуле:

$$\mathrm{tg}E_{0j}/2 = \sqrt{((1-e_j)/(1+e_j))} \cdot \mathrm{tg}\left(-\omega_j\right)/2. \quad (22)$$

Время движения j-го КА между указанными точками определяется по уравнению Кеплера в разностной форме [5]:

$$\Delta t_{Bj} = \left(T_j/(2\cdot\pi)\right)\cdot\left[\left(E_{kj} - E_{0j}\right) - e_j \cdot \left(\sin E_{kj} - \sin E_{0j}\right)\right]. \quad (23)$$

Угловой размер половины полосы обзора на экватор Земли вычисляется по правилу Непера (рис.7)

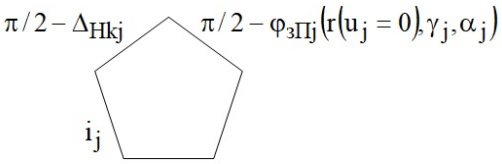


Рис. 7. Пятиугольник Непера для определения половины полосы обзора

$$\sin\Delta_{Hkj} = \mathrm{tg}\varphi_{зПj}\left(r\left(u_j = 0\right), \gamma_j, \alpha_j\right)\cdot \mathrm{ctgi}_j. \quad (24)$$

Долгота левой наклонной проекции на экватор Земли k-й точки РВВ ЧС для j-го КА определяется зависимостью

$$\lambda_{Bkj}{}^{Л} = \lambda_k - \Delta_{Bj} - \Delta_{Hkj} - \omega_з \cdot \Delta t_{Bj}. \quad (25)$$

Долгота правой наклонной проекции на экватор Земли k-й точки РВВ ЧС для j-го КА определяется зависимостью

$$\lambda_{Bkj}{}^{П} = \lambda_k - \Delta_{Bj} + \Delta_{Hkj} - \omega_з \cdot \Delta t_{Bj}. \quad (26)$$

Долгота левой точки наклонной проекции РВВ ЧС на экватор Земли для j-го КА на восходящих ветвях траектории определяется зависимостью

$$\lambda_{Bkj}{}^{Л} = \min_k\left\{\lambda_{Bkj}{}^{Л}\right\}. \quad (27)$$

Долгота правой точки наклонной проекции РВВ ЧС на экватор Земли для j-го КА на восходящих ветвях траектории определяется зависимостью

$$\lambda_{Bkj}{}^{П} = \max_k\left\{\lambda_{Bkj}{}^{П}\right\}. \quad (28)$$

Угловой размер наклонной проекции РВВ ЧС на экватор Земли для j-го КА на восходящих ветвях траектории определяется зависимостью

$$\Delta\lambda_{Bj} = \lambda_{Bj}{}^{П} - \lambda_{Bj}{}^{Л}. \quad (29)$$

Аналогичные формулы используются для определения левой и правой точек наклонной проекции РВВ ЧС на экватор Земли для j-го КА – $\lambda_{Hj}{}^{Л}, \lambda_{Hj}{}^{П}$ и углового размера наклонной проекции РВВ ЧС на экватор Земли для j-го КА на нисходящих ветвях траектории – $\Delta\lambda_{Hj}$.

Заключение. Представленная модель позволяет получать корректные результаты и может быть использована при проведении НИОКР по разработке систем мониторинга возникновения ЧС природного и техногенного характера, при оценивании вероятностей потенциально результативных пролетов КА заданной ОГ над заданным РВВ ЧС в любой момент времени на заданных интервалах времени, осредненных времен пролетов КА над РВВ ЧС и осредненных времен, когда над РВВ ЧС не пролетает ни один из КА.

Список литературы

1. Минаков, Е.П., Шафигуллин, И.Ш., Зубачев, А.М. Методы исследования эффективности применения

организационно-технических систем космического назначения: учебник. СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2016. 244 с.

2. Аверкиев Н.Ф., Богачев С.А., Васьков С.А. Основы теории полета летательных аппаратов. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2013. 242 с.

3. Мамон П.А. Приложение теорем сферической тригонометрии к решению практических задач: Учебное пособие. Вып.4 / П.А.Мамон, В.И.Половников. ВИКИ, 1973. 27 с.

4. Баринов К.Н., БуРВВ ЧСаев М.Н., Мамон П.А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. М.: «Машиностроение», 1975. 232 с.

5. Беляков А.И. Графо-аналитический метод исследования движения космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1973. 147 с.

Минаков Евгений Петрович, д-р техн. наук, профессор, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Александров Максим Андреевич, канд. техн. наук, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Мищеряков Александр Владимирович, адъюнкт, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

MODEL FOR CALCULATING THE PROBABILITY OF POTENTIALLY EFFECTIVE SPACECRAFT SPANS OVER THE AREA OF NATURAL OR MAN-MADE EMERGENCY

E.P. Minakov, M.A. Aleksandrov, A.V. Mishcheryakov

The article discusses the characteristics of the use of orbital groupings of spacecraft over areas of emergency situations on the surface of the Earth. A model for determining the boundaries of inclined projections of areas of emergency situations on the Earth's surface and a model for calculating the probability of potentially effective spacecraft spans over these areas are presented.

Key words: spacecraft, probability of potential effective flight.

Minakov Evgenii Petrovich, doctor of technical sciences, professor, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Aleksandrov Maxim Andreevich, candidate of technical sciences, docent, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Misheryakov Alexander Vladimirovich, postgraduate, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy A.F. Mozhaysky

УДК 658.262; 658.512:005
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-157-158

МЕТОДИКА РЕЖИМНОГО НОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ РЕСУРСНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

О.Р. Кивчун, Д.Г. Морозов

Рассмотрена методика режимного нормирования электропотребления объектов регионального электротехнического комплекса в условиях ресурсных ограничений. Она включает в себя блок формирования и обработки множества входных данных, блок мониторинга электропотребления, который позволяет постоянно анализировать множества внешних и внутренних факторов и блок режимного нормирования. Ключевым в методике является блок режимного нормирования, позволяющий сформировать план ресурсных ограничений объектов.

Ключевые слова: методика, ресурсные ограничения, электропотребление, региональный электротехнический комплекс, режимное нормирование, мониторинг.

Современные региональные электротехнические комплексы (РЭК) – это динамически развивающиеся системы, функционирование которых зависит от множества внешних и внутренних воздействующих факторов. Под РЭК понимается ограниченная в пространстве и времени обладающая системными свойствами взаимосвязанная совокупность потребителей электроэнергии, реализующая в единой системе управления и всестороннего обеспечения цель эффективного управления электропотреблением [1]. Основу потребителей современных РЭК составляют крупные предприятия региона, которые расходуют значительную часть электроэнергии. При управлении такими предприятиями одной из первостепенных задач является энергосбережение в различных условиях их функционирования.

Однако в Единой энергосистеме России существуют регионы, электроснабжение которых осуществляется изолированно или частично изолировано. К ним относятся территории Ямало-Ненецкого АО, Республики Саха (Якутии), Магаданской, Амурской Архангельской, Мурманской областей, а также Карелии. Кроме того, такая же ситуация существует в области Чукотского и Камчатского края, Югры и Ханты-Мансийского АО [2]. Данные территории имеют небольшое население, а также для них характерны неблагоприятные погодные происшествия, а также недостаточно качественная модернизация РЭК. Поэтому постоянно возникают проблемы с энергоресурсами и топливом для обеспечения жизнедеятельности их населения. Понятно, что задача энергосбережения и эффективного распределения энергоресурсов для таких регионов становится первостепенной.

Приравнять к таким регионам можно Калининградскую область. Она является отдалённой территорией Российской Федерации и граничит с странами Евросоюза. Основным видом топлива для производства электроэнергии являются газ и уголь, которые поступают в Калининградскую область через территорию Литвы по газопроводу и железной дороге, а также морским путём. Поэтому учитывая её геополитическое положение региона, постоянно существует вероятность перехода Калининградской энергосистемы в режим ресурсных ограничений с последующим переходом в изолированный режим. В этом случае актуальными становятся задачи обеспечения энергосбережения и энергоэффективности на объектах РЭК Калининградской области.

Для повышения энергосбережения и энергоэффективности руководством крупных предприятий на различных уровнях управления внедряются современные автоматизированные системы (АС) и программно-аппаратные комплексы (ПАК). Однако они выполняют в основном учётные функции и позволяют только визуализировать рассматриваемый процесс. Причём инструменты обработки данных, получаемых с цифровых приборов систем учёта энергоресурсов не позволяют получить наибольший эффект при применении их в расчётных операциях. Кроме того, современные АС и ПАК содержат небольшое количество специального программного обеспечения, реализующего научно обоснованные методы, модели и методики управления энергоресурсами [3-7].

Таким образом, возникает противоречие, с одной стороны, между необходимостью реализации режимов, ограничивающих максимальную мощность потребляемой энергии объектами РЭК, и, с другой стороны невозможностью методически и инструментально в автоматическом режиме обеспечить приоритеты при ранжировании потребителей электроэнергии по важности в условиях ресурсных ограничениях. Для разрешения данного противоречия разработана и реализована методика режимного нормирования электропотребления объектов РЭК в условиях ресурсных ограничений (рис. 1).

Рис. 1. Структура методики режимного нормирования электропотребления

Она включает в себя блок формирования и обработки множества входных данных, блок мониторинга электропотребления, который позволяет постоянно анализировать множества внешних и внутренних факторов и блок режимного нормирования.

В блоке формирования и обработки множества входных данных реализуются следующие операции: формирование множества сырых данных, форматирование и верификации, а также категорирование потребителей или приемников электроэнергии по категориям электроснабжения.

Блок мониторинга электропотребления включает в себя расчетные модули, основанные на процедурах рангового анализа: построение рангового параметрического распределения [1], аппроксимация рангового параметрического распределения, построение области допустимых значений [1] (ОДЗ) и интервальное оценивание.

После их реализации осуществляется мониторинг электропотребления, а также учёт внешних и внутренних факторов, влияющих на процесс управления энергоресурсами в условиях ресурсных ограничений. Далее на основе полученных исходных данных в сложившейся обстановке лицо принимающее решение (ЛПР) определяет необходимость реализации режимного нормирования электропотребления. В случае отсутствия необходимости реализации данной процедуры в режиме реального времени продолжается осуществляется мониторинг электропотребления объектов РЭК.

Ключевым в методике является блок режимного нормирования, включающий следующие этапы: выбор категории объектов для ограничения электропотребления, формирование целевой функции ограничения, ограничение по электропотреблению, проверка частоты электрического тока в энергосистеме, построение R-распределений, формирование плана ресурсных ограничений и выработка плана реализации ресурсных ограничений для объектов РЭК. Рассмотрим подробнее каждый блок методики.

Подготовка данных для передачи их в базу данных осуществляется в четыре этапа. На первом этапе идет процедура верификации данных. Эта процедура, которая позволяет исправить нулевые данные, явно ошибочные данные, абсолютно равные данные и восстановить потерянные данные. Устранение нулевых данных осуществляется с помощью кусочно-постоянной интерполяции. Для устранения явно ошибочных данных применяется линейная интерполяция. Абсолютно равные данные устраняются полиномиальной интерполяцией, а восстанавливаются данные с помощью сплайн-интерполяции. Второй этап предусматривает ранжирование полученных сырых данных. При ранжировании формируется матрица, столбцы которой являются табулированным ранговым параметрическим распределением с отдельными временными интервалами, а также формируется вектор рангов и количество объектов. На третьем этапе реализуется аппроксимация рангового параметрического распределения методом наименьших квадратов. Эта процедура позволяет свести задачу подготовки данных к работе с более простыми объектами. На завершающем этапе реализуется процедура интервального оценивания, результатом которой является построение ОДЗ. Результаты данных по мониторингу электропотребления выводятся на автоматизированном рабочем месте (АРМ) режимного нормирования. На рисунке 2 представлен фрагмент подготовки и интервального оценивания данных по электропотреблению в АРМ режимного нормирования (рис. 2).

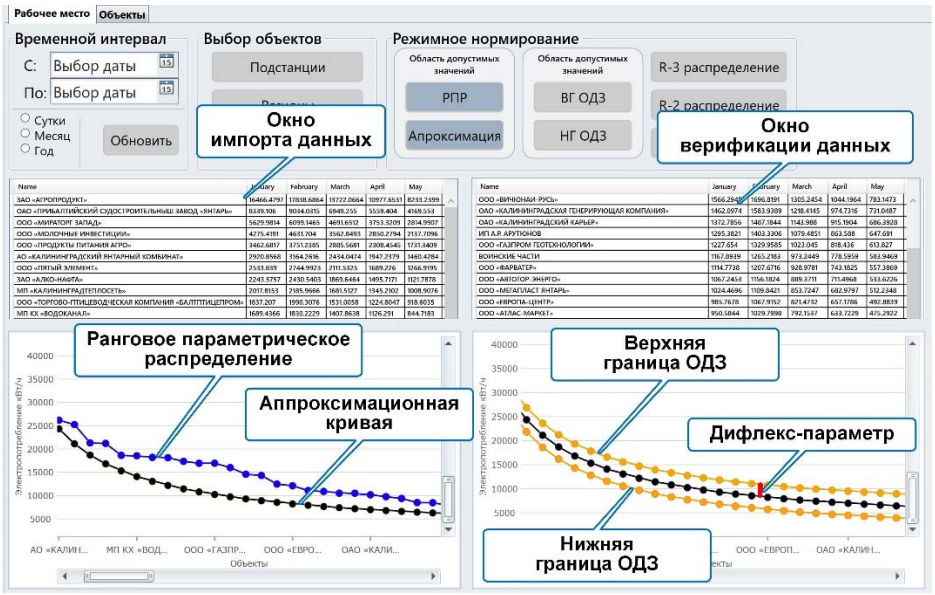


Рис. 2. Фрагмент подготовки и интервального оценивания данных по электропотреблению в АРМ режимного нормирования

Важной операцией мониторинга электропотребления является учёт влияния внешних и внутренних факторов, которые делятся на несколько категорий. Степень внезапности возникновения вышеуказанных факторов показывает можно ли прогнозировать в обозримом бедующем те либо иные события, будут ли они ожидаемы или нет, затяжными или краткими. Это в первую очередь касается вероятности введения штабом правительства региона плана ресурсных ограничений. По скорости распространения факторы делятся на взрывные, скоротечные, стремительные и плавные. Учет внешних факторов на объектах РЭК необходим с целью обеспечения устойчивости электропотребления объектов. На уровне процесса управления электропотребления идет учет и анализ всех влияющих факторов. Важным элементом в блоке мониторинга электропотребления является процедура категорирования объектов РЭК по надёжности электроснабжения электроприемников. Данная процедура осуществляется в соответствии с Правилами устройства электроустановок [8]. На рисунке 3 представлен фрагмент программной реализации категорирования объектов РЭК по надёжности электроснабжения электроприемников.

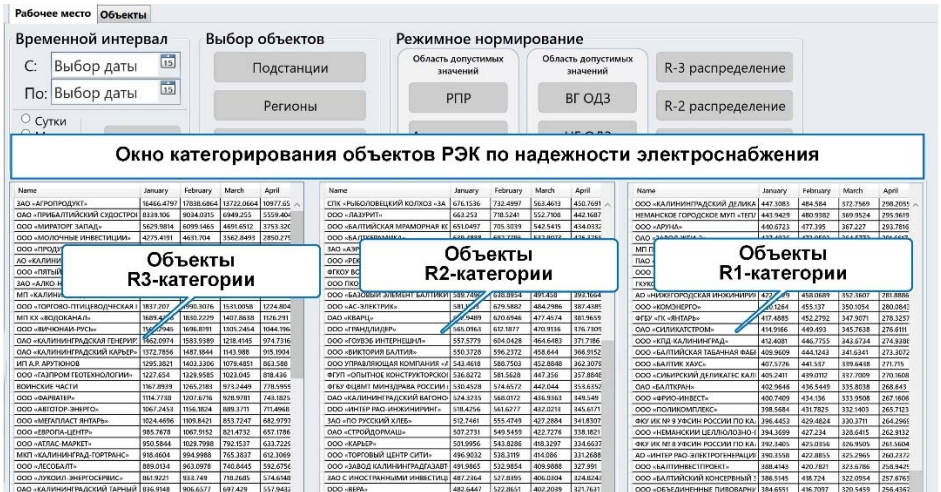


Рис. 3. Фрагмент программной реализации категорирования объектов по надёжности электроснабжения электроприемников

Новизной представленной методики является алгоритмическая структура и специальное программное обеспечение, реализующее режимное нормирование электропотребления в условиях ресурсных ограничений. После того как ЛПР определило необходимость реализации ограничений определяется целевая функция для данного процесса. Первоначально величину ограничения предписывает в специальном распоряжении штаб, созданный при правительстве региона, а руководитель регионального диспетчерского управления принимает данные распоряжения к исполнению в виде Графиков ограничения режима потребления электрической энергии. Методика содержит научно обоснованный алгоритм расчёта индивидуальной нормы ограничения для каждого потребителя на основе процедуры режимного нормирования. Для этого впервые предлагается введение R-режимов.

Предлагаются следующие режимы: R3-режим частичного ограничения, при котором на всех объектах должны быть принудительно отключены от ресурсоснабжения потребители третьей категории – второстепенные потребители, непосредственно не оказывающие влияния на выполнение объектами основных задач; R2-режим, при котором на всех объектах, помимо потребителей третьей категории, должны быть принудительно отключены от ресурсоснабжения потребители второй категории – потребители, отключение которых в течение определенного промежутка времени не оказывает влияния на выполнение объектами основных задач; R1-режим, при котором на всех объектах, помимо потребителей второй и третьей категорий, должны быть принудительно отключены от ресурсоснабжения потребители первой категории – потребители, определяющие выполнение объектами основных задач. R3-режим не ограничен по времени (в рамках общего периода ресурсных ограничений) и не приводит к снижению основной функциональности. R2-режим приводит к частичному снижению функциональности и должен быть ограничен промежутком времени, в течение которого допустимо заданное снижение функциональности и происходит восстановление R3-режима. R1-режим приводит к существенному снижению функциональности и должен быть ограничен предельно коротким промежутком времени, в течение которого должно осуществляться бесперебойное ресурсоснабжение особой группы потребителей первой категории и восстановление R2-режима [9]. Формирование R-режимов осуществляется в рамках рангового анализа с помощью аппарата R-распределений [1, 4]. Алгоритм реализации R-режимов представлен на рисунке 4.

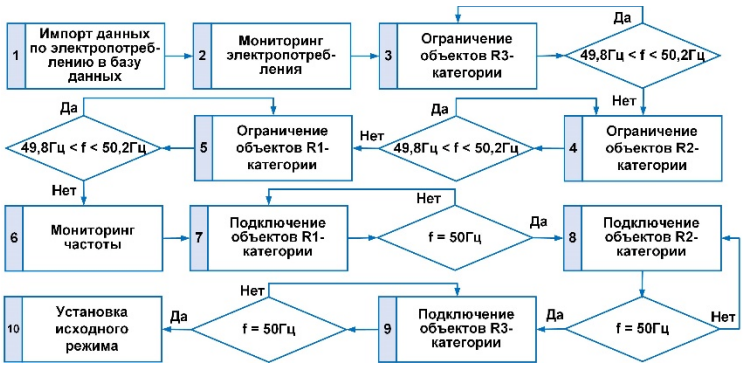


Рис. 4. Алгоритм реализации R-режимов

На первом этапе алгоритма ограничиваются по электропотреблению объекты третьей категории и строится R3-распределение. Если после ограничения по электропотреблению частота электрического тока находится в диапазоне от 49,8 Гц до 50,2 Гц, то осуществляется мониторинг электропотребления в режиме реального времени до окончания ресурсных ограничений. После окончания осуществляется выход объектов из R3-режима для функционирования в нормальном режиме. В случае, когда частота электрического тока не находится в диапазоне от 49,8 Гц до 50,2 Гц, то вводится R2-режим и строится R2- распределение. При этом ограничиваются уже объекты второй категории. Соответственно, если после введения R2-режима частота не изменилась, реализуется R1-режим с построением R1-распределения. После завершения ресурсных ограничений осуществляется планомерный переход объектов РЭК в нормальный режим функционирования.

Отличительной особенностью режимного нормирования электропотребления является расчёт для каждого объекта РЭК индивидуальной нормы ограничения по электропотреблению, после применения которой строятся R3,2,1-режимы. В алгоритме режимного нормирования впервые введено понятие lm-нормы (читается как «лм») под которой понимается – функционал, заданный для каждого объекта на R-распределении, представляющий собой абсолютную величину ограничения электропотребления, при реализации которой не нарушается технологический процесс его функционирования объекта. На рисунке 5 представлен алгоритм расчёта lm-нормы для R-режимов по электропотреблению.

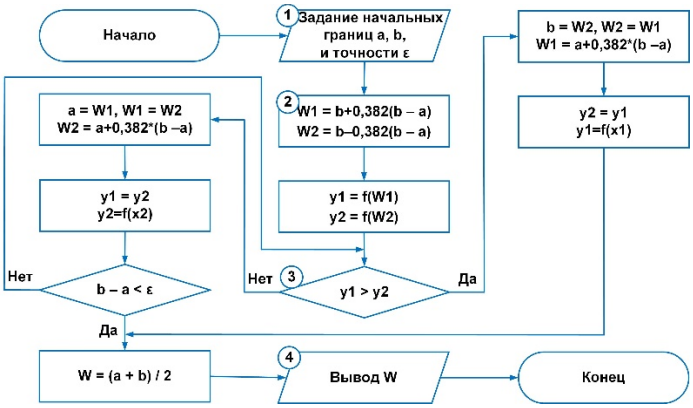


Рис. 5. Алгоритм расчёта lm-нормы для R-режимов по электропотреблению

Алгоритм lm-нормы основывается на методе Золотого сечения. На первом этапе расчёта lm-нормы реализуется задание её начальных границ. Исходными данными для расчёта являются значения нижней границы ОДЗ, аппроксимированные значения b и точности ε, искомого минимума. Следующим шагом идет расчет координат точек деления W1 и W2, а также значения в них функции f(W). W – Значение электропотребления объекта.

Для поиска точки минимума необходимо условие, когда значение функции f(W1) будет больше, чем значение функции f(W2). Путем сравнения определяются следующие отрезки с последующим делением на две неравные части. Деление отрезка происходит по правилу золотого сечения. При каждой новой итерации ищется только одно значение критерия оптимальности. Расчёт lm-нормы позволяет определить минимальное расстояние между нижней границей доверительного интервала и аппроксимированного значения эмпирического рангового и видового распределения, но больше заданной точности. На завершающем шаге происходит построение R-распределения, формирование и реализация плана ресурсных ограничений функции f(W2). На рисунке 6 показ фрагмент реализации расчёта lm-нормы в специальном программном обеспечении автоматизированного рабочего места режимного нормирования.

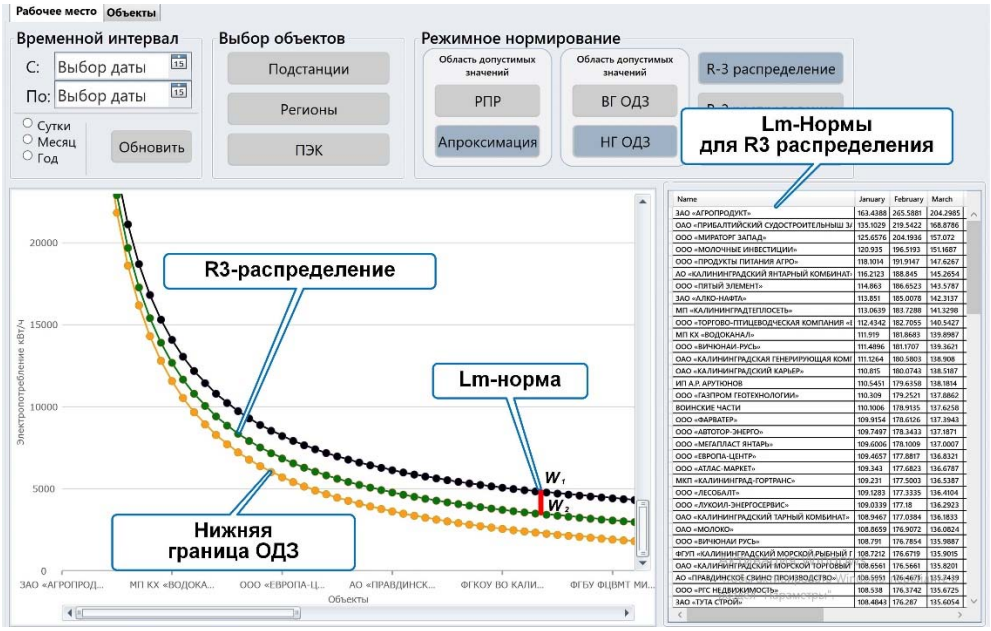


Рис. 6. Фрагмент реализации расчёта lm-нормы в специальном программном обеспечении автоматизированного рабочего места режимного нормирования

Для реализации специального программного обеспечения режимного нормирования в среде Visual Studio 2022 разработано АРМ. В его состав входят следующие программные панели: выбора исходных данных и запуска основных процедур режимного нормирования (построение ранговых распределений, аппроксимация, определение доверительных границ и lm-норм), визуального отображения R-распределений при установлении R-режимов и панель вывода табличных данных. Каждую панель можно развернуть на полный экран и произвести распечатку данных на принтере. Данные для АРМ импортируются в соответствии с заранее сформированными шаблонами запросов к базе данных и с помощью расчётных плагинов позволяют представлять выполненные расчёты по режимному нормированию. Разработка интерфейса, расчётных и графических плагинов осуществлялась на языке C#.

Проверка работоспособности методики осуществлялась на данных по электропотреблению крупных потребителей Калининградской области, которые представлены в Распоряжении Губернатора Калининградской области № 41-р от 22 августа 2022 г. «Об утверждении схемы и программы перспективного развития энергетики Калининградской области на 2023-2027 годы и признании утратившим силу отдельного решения Губернатора Калининградской области» [10]. Существующие величины ограничения крупных потребителей при введении ресурсных ограничений импортированы из Графиков ограничения режима потребления электрической энергии на 2023-2024 гг. по АО «Россети Янтарь» по Калининградской области [11].

На основе данных документов сформирована таблица данных по электропотреблению крупных потребителей Калининградской области с 2015 по 2022 гг. По выборке данных за 2022 год реализована методика ограничения электропотребления объектов РЭК в условиях ресурсных ограничений. Получены значения lm-нормы для R3-режима функционирования и построено R3-распределение W_{R3} (рис. 7). На основе величины ограничения электропотребления крупных потребителей, предусмотренных Графиком ограничения режима потребления электрической энергии на 2021-2022 гг. по АО «Россети Янтарь» по Калининградской области получено ранговое параметрическое распределение W_{fact} (рис. 7).

В результате анализа построенных распределений рассчитаны потенциалы энергосбережения. Для R3-распределения, который составил 824270 кВт·ч, а фактического распределения (полученного по графику ограничения АО «Россети Янтарь») W_{fact} – 922989 кВт·ч. Потенциал энергосбережения представляет собой разницу интегральных сумм электропотребления между нижней границей ОДЗ и ранговым распределением. В результате многочисленных исследований установлено, что показателем качества электропотребления является нижняя граница ОДЗ [1, 3-7]. Соответственно, чем ближе значения по электропотреблению находятся к нижней границе, тем энергоэффективность объекта лучше. Сравнение потенциалов энергосбережения двух распределений показали, что потенциал R3-распределения меньше, т.е. форма распределения ближе к нижней границе ОДЗ. Это показывает, что при ограничении на основе значений R3-распределения можно получить наибольшую экономию энергоресурсов в условиях режимных ограничений без ущерба технологическому процессу. При ограничении на основе значений рангового распределения W_{fact} объекты РЭК обладают большим потенциалом энергосбережения, который можно сократить.

При дальнейшей реализации методики были сформированы научно обоснованные предложения для реализации R2 и R1-режимов по ограничению электропотребления для данного года на каждый месяц.

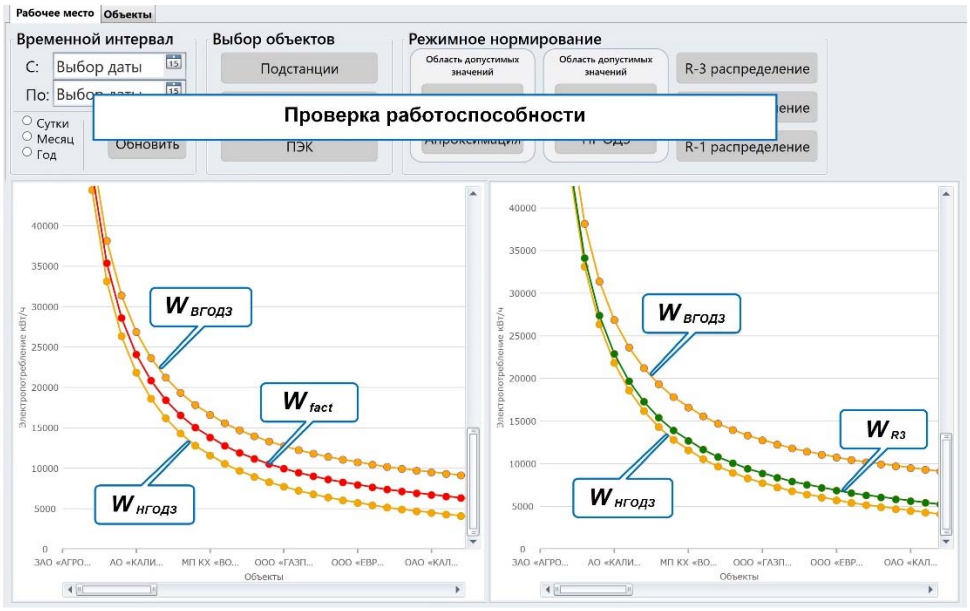


Рис. 7. Фрагмент реализации проверки работоспособности методики

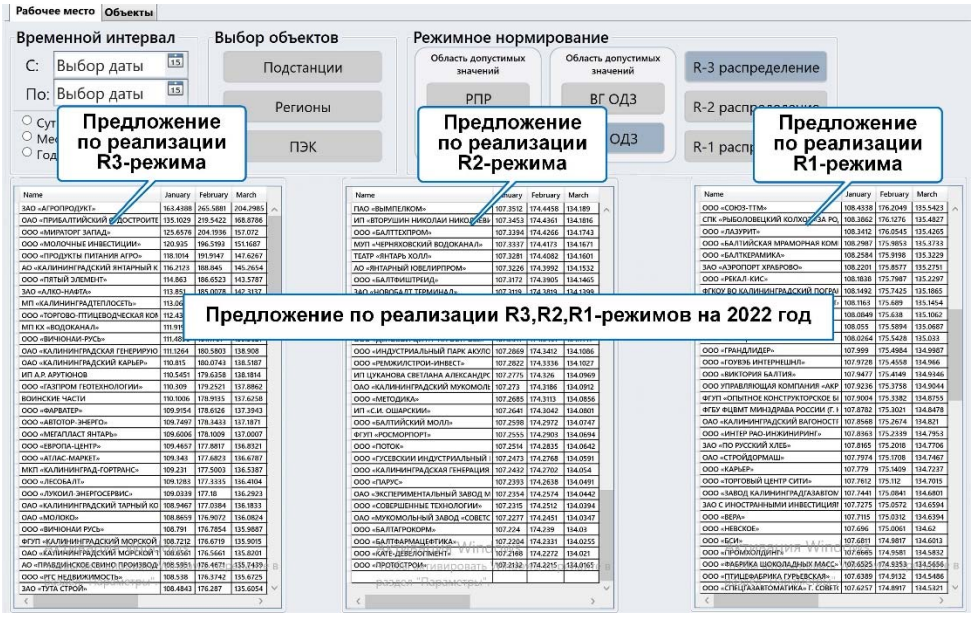


Рис. 8. Фрагмент формирования предложений по реализации R-режимов

Таким образом, впервые разработанная методика позволяет реализовать научно обоснованный алгоритм режимного нормирования по электропотреблению объектов РЭК в условиях режимных ограничений. Отличительной особенностью методики является реализация впервые разработанного аппарата R-распределений, позволяющего определить индивидуально для каждого объекта lm-норму. На её основе для каждого объекта формируется величина снижения ресурса. После чего строится новое ранговое распределение, которое соответствует заданному R-режиму в условиях ресурсных ограничений. Для разработки математического аппарата получения lm-нормы использовались методы рангового анализа и «золотого сечения», а также стандартные инструменты математической статистики.

Кроме того, представленная методика реализована с помощью специального программного обеспечения режимного нормирования электропотребления. Для удобства использования программного обеспечения создано АРМ оператора, реализующего режимное нормирование электропотребления объектов РЭК. Программирование АРМ осуществлялось на языке C# в среде Visual Studio 2022.

Проверка работоспособности методики на данных по электропотреблению крупных потребителей Калининградской области показала, что потенциал энергосбережения в условиях ресурсных ограничений R3-распределения значительно выше, что позволяет осуществить наибольшую экономию энергоресурсов в условиях режимных ограничений без ущерба технологическому процессу и считать предложенную методику работоспособной.

Список литературы

1.Техника, техносфера, энергосбережение [Сайт] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. М.: [б.и.], 2000. Рег. от 23.11.2005 № 5409. [Электронный ресурс] URL: http://gnatukvi.ru/index.files/terminy.htm#anchor_r (дата обращения: 10.05.2023).

2.Киушкина В.Р. Повышение энергетической безопасности децентрализованных зон электроснабжения регионов северных территорий и арктических зон (на примере республики САХА (Якутия)): дис. … док. тех. наук: 05.14.01: утв. 15.07.20. М., 2020. 400 с.

3.Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Морозов Д.Г. Модель режимного нормирования электропотребления объектов регионального электротехнического комплекса на основе r-распределений // Актуальные вопросы энергетики. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Редколлегия: П.А. Батраков (отв. ред.) [и др.]. Омск. 2023. С. 144-151.

4.Кивчун О.Р. Режимное нормирование электропотребления объектов региональной электротехнического комплекса на основе векторного рангового анализа // Промышленная энергетика. 2023. № 4. С. 48-58.

5.Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Морозов Д.Г. Реализация процедуры режимного нормирования для подсистем регионального электроэнергетического комплекса // сборник: Фёдоровские чтения – 2021. LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. Москва. 2021. С. 16-22.

6.Кивчун О.Р. Метод управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса на основе учёта добавочного ресурса // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4-4 (54). С. 65-72.

7.Кивчун О.Р. Реализация стратегии снижения электропотребления объектов припортового электротехнического комплекса на основе векторного рангового анализа // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4 (46). С. 139.

8.Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии, утверждённые Приказом Минэнерго России от 12 августа 2022 г. № 811 // Министр Н.Г. Шульгинов. 120 с.

9.Режимное нормирование электропотребления при эксплуатации объектов регионального электротехнического комплекса / В.И. Гнатюк и др. // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-3 (42). С. 116-120.

10. Об утверждении схемы и программы перспективного развития энергетики Калининградской области на 2023-2027: распоряжении Губернатора Калининградской области от 22 августа 2022 г. № 41-р. [Электронный ресурс] URL: https://infrastruktura.gov39.ru/41-%D1%80.pdf (дата обращения: 10.05.2023).

11. Дополнительные сведения, обязательные для раскрытия обществом [Сайт] // График ограничения режима потребления электрической энергии на 2021-2022 гг. по АО «Янтарьэнерго» на территории Калининградской области. Электронные текстовые данные. Калининград. [Электронный ресурс] URL: https://rosseti-yantar.ru/raskrytie-informatsii/raskrytie-informatsii-obshchestvom/dopolnitelnye-svedeniya-obyazatelnye-dlya-raskrytiya-obshchestvom (дата обращения: 10.05.2023).

Кивчун Олег Романович, канд. техн. наук, доцент, oleg_kivchun@mail.ru, Россия, Калининград, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,

Морозов Дмитрий Геннадьевич, аспирант, morozov@dmitry.by, Россия, Калининград, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

THE METHODOLOGY OF REGIME RATIONING POWER CONSUMPTION OF REGIONAL FACILITIES ELECTRICAL COMPLEX IN THE CONDITIONS OF RESOURCE CONSTRAINTS

O.R. Kivchun, D.G. Morozov

The method of regime regulation of power consumption of objects of the regional electrotechnical complex in the conditions of resource constraints is considered. It includes a block for generating and processing a variety of input data, a block for monitoring power consumption, which allows you to constantly analyze a variety of external and internal factors, and a block for regime rationing. The key in the methodology is the block of regime rationing, which allows you to form a plan for resource constraints of objects.

Key words: methodology, resource constraints, power consumption, regional electrotechnical complex, regime rationing, monitoring

Kivchun Oleg Romanovich, candidate of technical sciences, docent, oleg_kivchun@mail.ru, Russia, Kaliningrad, Immanuel Kant Baltic Federal University,

Morozov Dmitry Gennadievich, postgraduate, morozov@dmitry.by, Russia, Kaliningrad, Immanuel Kant Baltic Federal University

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-164-165

ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ PDM-СИСТЕМЫ SMARTEAM

Е.А. Ураскин, И.Н. Хаймович

Данная статья посвящена исследованию организации технологической подготовки производства с использованием PDM-системы SmarTeam. Целью работы было изучить проблемы предприятий при внедрении систем управления данными о продукции и выявить возможности SmarTeam для решения этих задач. В статье проведен анализ основных проблем и подходов к управлению данными о продукции. Показано, что PDM-система SmarTeam способна решить многие из этих проблем, включая недостаточную координацию между отделами, отсутствие единого хранилища информации, сложность обновления и контроля данных. Далее предложена методика внедрения SmarTeam на предприятии, которая включает определение этапов и последовательности действий, обучение сотрудников и контроль за процессом внедрения. Приведены конкретные примеры применения SmarTeam для улучшения технологической подготовки производства. В заключении подчеркнута значимость внедрения SmarTeam для повышения эффективности, точности и скорости технологической подготовки производства. Результаты и рекомендации, полученные в рамках работы, могут быть использованы предприятиями для повышения конкурентоспособности и оптимизации производственных процессов.

Ключевые слова: PDM-система, технологическая подготовка производства, продукция, бизнес-процессы.

Введение. В современном мире, где технологический прогресс и инновации играют важную роль в развитии экономики, технологическая подготовка производства становится неотъемлемой частью успешного функционирования предприятий. Она является ключевым инструментом для достижения высокой эффективности производственных процессов, повышения качества продукции и удовлетворения потребностей клиентов [1].

Технологическая подготовка производства – это комплекс мероприятий, направленных на организацию процессов производства с использованием современных технических решений, оборудования и программного обеспечения [2]. Она включает в себя анализ и оптимизацию производственных циклов, разработку технологических карт и инструкций, выбор и внедрение новых технологий, обучение персонала и контроль выполнения задач.

Важно отметить, что эффективная технологическая подготовка производства является важным условием успешного конкурентоспособного развития предприятия. Она позволяет повысить производительность труда, сократить затраты на производство, улучшить качество продукции и обеспечить своевременную доставку товаров на рынок.

Технологическая подготовка производства также является неотъемлемой частью современного бизнеса, позволяющей предприятиям эффективно функционировать в условиях быстро меняющегося рынка. Современные технологии и методы позволяют повысить производительность, сократить затраты и улучшить качество продукции, обеспечивая конкурентное преимущество и удовлетворение потребностей клиентов [3, 4].

В настоящее время при проектировании нового изделия выпускается большое количество различных типов документов, но в основном без какого-либо моделирования основных функций этого изделия, его режимов работы и т.д. На этапе строительства после разработки конструкторской документации (КД) начинается подготовка производства, включающая не только планирование работ, но также деятельность многочисленных подрядчиков, субподрядчиков и поставщиков.

Не существует общих для всех инструментов и методов, которые могли бы быть использованы на различных стадиях проектирования и технологической подготовки производства. Даже в рамках одного этапа множество различных задач решаются без какой-либо связи и координации между собой, в результате чего возникает большое количество проблем, требующих времени на их устранение, а также материально-технических вложений, приводящих к необоснованным экономическим затратам [5, 6].

Координация разрозненных усилий занимает много времени и часто бывает малоэффективной, в большинстве случаев реальное продуктивное взаимодействие возможно только на этапе строительства. Как правило, многочисленные ошибки, заложенные на ранних стадиях проектирования, исправляются ценой весьма затратных решений [7], поэтому целесообразно применять единое информационное пространство производства на базе PDM-систем. Одной из таких PDM-систем является SmarTeam (табл. 1, рис.1).

Основные возможности SmarTeam включают в себя следующее.

1.Централизованное управление данными о продукте;

2.Управление версиями и конфигурациями;

3.Управление доступом и правами пользователей;

4.Коллаборация;

5.Интеграция с другими системами.

Преимущества использования SmarTeam в организации технологической подготовке производства включают следующее пуекты.

1. Улучшенная эффективность и точность: SmarTeam позволяет контролировать и управлять данными о продукте на всех этапах производства, что помогает улучшить эффективность и точность процесса разработки и производства.

2. Более быстрое принятие решений: Централизованное хранение и доступ к данным о продукте позволяет сократить время на поиск необходимой информации и принятие решений.

3. Улучшенное сотрудничество и коммуникация: SmarTeam облегчает сотрудничество между участниками проекта, позволяя им обмениваться информацией и комментариями, а также отслеживать изменения и комментарии.

Улучшенное управление жизненным циклом продукта: SmarTeam предоставляет функциональность управления жизненным циклом продукта, что позволяет организации эффективно управлять всеми этапами жизненного цикла продукта: от концепции и разработки до производства и обслуживания.

Таблица 1

Общая функциональная модель бизнес-процессов технологической подготовки производства

Этап жизненного цикла БД	Действующие лица (акторы)	Базовые функции
ШТАТНАЯ РАБОТА ПО ТПП	Технолог	Формирование классификатора оборудования
		Формирование номенклатора оборудования
		Работа с операционным справочником
		Формирование типового ТП
		Разработка ТП на конкретное изделие
		Привязка ТТП к изделию
		Автоматизированное формирование ТД
		Формирование документа: Маршрутная карта
		Формирование документа: Маршрутный лист
		Формирование документа: Ведомость норм времени
		Формирование документа: Карта наладки и Карта контроля
	Архивариус ТД	Работа архивом ТД
		Выдача заявок на тираж твёрдых копий
		Выдача заявок на тираж электронных копий
		Получение твёрдых копий из архива
		Получение электронных копий из архива

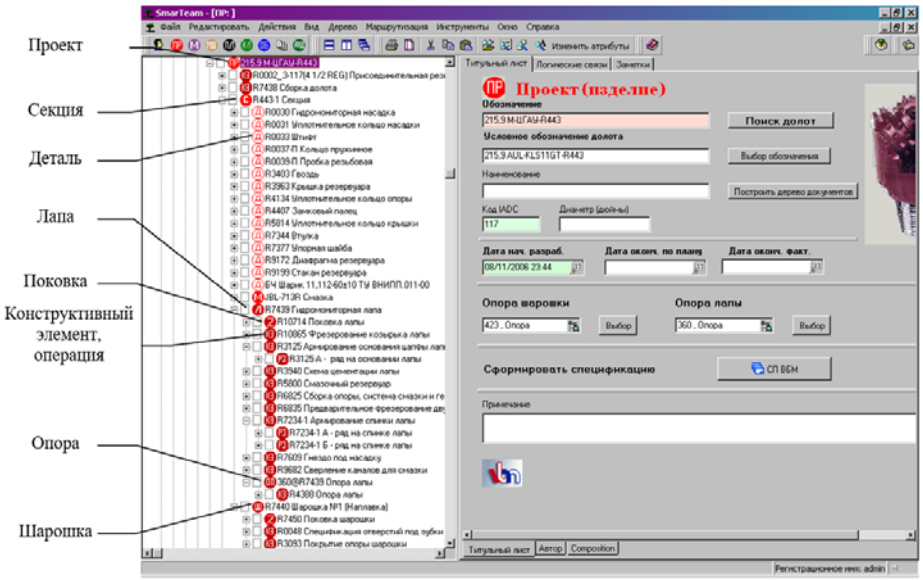


Рис.1. Рабочее пространство PDM-системы SmarTeam

Управление жизненным циклом продукта помогает более эффективно планировать и контролировать процессы разработки, уменьшать затраты и сроки, а также повышать качество продукта.

SmarTeam является мощной и гибкой PDM-системой, которая предлагает широкий набор возможностей и интеграцию с другими инструментами, что делает ее привлекательным выбором для организаций, работающих в сфере технологической подготовки производства и стремящихся к улучшению эффективности и точности разработки продукта.

Рассмотрим подробно этапы жизненного цикла объектов в PDM-системе SmarTeam. При технологической подготовке производства в PDM-системе SmarTeam можно выделить следующие основные этапы жизненного цикла объектов.

1. Создание объектов: На этом этапе создаются объекты, которые будут использоваться в рамках технологической подготовки производства, например, изделия, компоненты, операции, технологические карты и другие. Они могут быть созданы из шаблонов, импортированы из других систем или созданы с нуля.
2. Разработка объектов: На этом этапе происходит разработка объектов и их атрибутов, например, определение параметров изделий, параметров операций, материалов, технических требований и др. SmarTeam предоставляет средства для создания и редактирования атрибутов объектов, а также для управления связями между ними.
3. Утверждение объектов: На этом этапе объекты проходят процесс утверждения, позволяющий регулировать доступи контролировать версии. Устанавливаются права доступа к объектам, определяются этапы утверждения и список утверждающих лиц. В случае необходимости можно также включить процесс ревизии и изменения.
4. Использование объектов: На этом этапе объекты используются в рамках проектирования и планирования производства. Например, объекты изделий могут быть использованы для создания сборочных единиц и обозначения компонентов, а объекты операций - для определения последовательности и параметров процессов производства.
5. Обновление объектов: На этапе обновления происходит внесение изменений в объекты, связанные с технологической подготовкой производства. Это может быть изменение параметров изделий, добавление новых операций или изменение параметров существующих, внесение правок в технологические карты и т.д. SmarTeam позволяет контролировать изменения, отслеживать их и управлять версиями объектов.

6. Утилизация объектов: На этапе утилизации объекты удаляются или переносятся в архив, если они уже не используются в производстве или устарели. При этом сохраняется информация об объектах и их версии для возможности восстановления или исторического анализа.

Каждый из этих этапов в PDM-системе SmarTeam при технологической подготовке производства обладает своими функциональными возможностями, позволяющими эффективно управлять данными о объектах и их жизненным циклом.

На рисунке 2 представлена схема жизненного цикла объектов в SmarTeam.

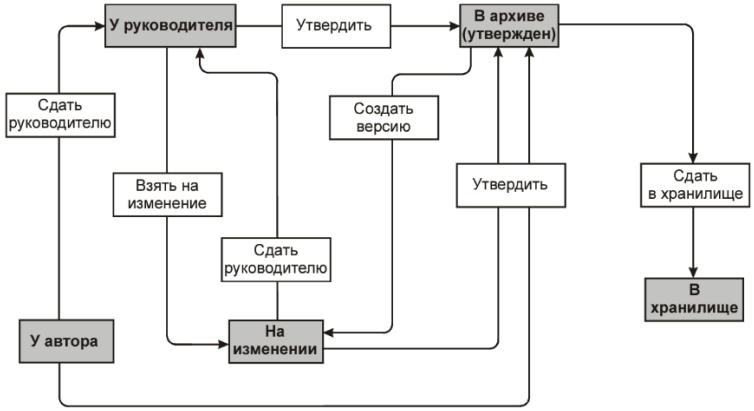


Рис.2. Схема жизненного цикла объектов

Важно отметить то, что объект на протяжении своего жизненного цикла не обязательно проходит все состояния.

Таблица 2 содержит список всех возможных состояний объекта и значки, которыми объект помечается в SmarTeam, находясь в том или ином состоянии [8].

Таблица 2

Состояния объекта в процессе жизненного цикла

	У автора (New)	Объект создается текущим пользователем (автором). Файл этого объекта находится в личном каталоге данного пользователя.
	У автора – другого пользователя (New by Other)	Объект создается другим пользователем (автором) и еще не сдан на стол начальника.
	На изменении (Checked Out)	Объект находится на изменении текущим пользователем. Файл этого объекта находится в личном каталоге данного пользователя.
	На изменении другим пользователем (Checked Out by Other)	Объект находится на изменении другим пользователем.
	У руководителя (Checked In)	Объект находится у руководителя. Файл этого объекта находится в каталоге, доступном нескольким пользователям.
	На столе начальника, не последняя версия (Checked In Not Latest)	Объект находится на столе начальника, но это не последняя версия.
	У руководителя, используется (Checked In, Under Operation)	Объект находится у руководителя. Другая версия объекта изменяется.
	Утвержден (Released)	Объект утвержден. Файл объекта находится в каталоге утвержденных файлов.
	Утвержден, не последняя версия (Released Not Latest)	Объект утвержден, но это не последняя версия.
	Утвержден, используется (Released, Under Operation)	Объект утвержден. Другая версия объекта изменяется.
	В хранилище (Obsolete)	Объект находится в хранилище. Файл объекта находится в каталоге хранилища.

Внедрение SmarTeam необходимо для повышения эффективности и улучшения контроля над проектами и документами организации. Текущие системы управления данными не справляются с растущим объемом информации и требуют автоматизации и интеграции с различными производственными процессами. SmarTeam был выбран в качестве PDM-системы в результате анализа рынка и оценки его функциональности, гибкости и соответствия требованиям организации.

Внедрение SmarTeam может включать в себя несколько этапов, и в процессе этой реализации может возникнуть ряд проблем. Рассмотрим некоторые из них и возможные решения.

1. Проблема: Разработка и настройка бизнес-процессов. При внедрении SmarTeam необходимо разработать и настроить бизнес-процессы в соответствии с требованиями организации. Это может быть сложной задачей, так как требуется понимание текущих процессов и адаптация их к функциональности SmarTeam.

Решение: Перед началом внедрения необходимо провести детальный анализ бизнес-процессов и определить критические области, которые требуют изменений. Затем следует разработать новые процессы, определить требования к системе и настроить SmarTeam в соответствии с этими требованиями.

2. Проблема: Интеграция существующих систем. Часто перед внедрением SmarTeam организации уже используют другие системы (например, системы управления заказами, ERP и др.), и требуется интеграция SmarTeam с этими системами.

Решение: Для успешной интеграции необходимо провести анализ существующих систем и определить потоки данных, которые должны быть обменены между SmarTeam и другими системами. Затем следует разработать механизмы интеграции, такие как API или средства передачи данных, чтобы обеспечить синхронизацию информации между различными системами.

3. Проблема: Обучение пользователей. При внедрении новой системы пользователи, которые ранее работали с другими системами, могут испытывать сложности в освоении новых методов работы и функциональности SmarTeam.

Решение: Используйте тренинги и обучающие программы для обучения пользователей новым функциям и процедурам работы с SmarTeam. Предоставьте документацию, инструкции и онлайн-ресурсы для самостоятельного освоения системы. Обеспечьте техническую поддержку для решения возникающих проблем и вопросов пользователей.

4. Проблема: Управление изменениями. Внедрение SmarTeam требует изменений в процессах и поведении пользователей, что может вызвать сопротивление со стороны сотрудников и затруднить успешную реализацию.

Решение: Разработайте план управления изменениями, который включает в себя коммуникацию между сотрудниками, обучение, поддержку и информирование о преимуществах, которые принесет внедрение SmarTeam. Проводите регулярные совещания и обратную связь с сотрудниками, чтобы учитывать их мнение и решать их проблемы.

Важно понимать, что каждая организация может столкнуться с уникальными проблемами и требованиями при внедрении SmarTeam. Поэтому рекомендуется провести тщательный анализ и планирование, чтобы успешно реализовать систему управления жизненным циклом продукта на основе SmarTeam.

Заключение. В рамках работы был проведен анализ основных проблем, с которыми сталкиваются предприятия при внедрении систем управления данными о продукции. Было выяснено, что эффективное использование PDM-системы SmarTeam способно значительно улучшить производственные процессы, максимизировать эффективность и качество работы.

В итоге, после внедрения SmarTeam организации выделяют следующие моменты:

снижение времени на обработку информации и управление изменениями.

улучшение качества продукта за счет более надежного контроля документации.

сокращение сроков проектов благодаря оптимизации рабочих процессов и упрощению координации между различными департаментами.

увеличение прозрачности и удовлетворенности клиентов за счет более оперативной и эффективной коммуникации с ними.

Анализ показал, что внедрение SmarTeam принесло значительные выгоды и положительное влияние на производительность и качество работы организации [9].

Однако, необходимо учитывать особенности каждого конкретного предприятия при выборе и внедрении PDM-системы SmarTeam. Необходимо провести тщательный анализ проблем и потребностей предприятия, а также обеспечить адекватное обучение и поддержку персонала [10, 11]. Разработанная общая функциональная модель бизнес-процессов технологической подготовки производства требует дальнейшей специадизации под конкретное производство.

Список литературы

1 Khaimovich I.N. Computer aided design of blank forging production facilities for aircraft engine compressor blades // Russian Aeronautics. 2014. № 57(2). P. 169–174.

2 Хаймович И. Н. Методология организации согласованных механизмов управления процессом конструкторско-технологической подготовки производства на основе информационно-технологических моделей: автореф. дис. на соискание степени д-ра техн. наук / И. Н. Хаймович. Самара, 2008. 35 с.

3 Гречников Ф.В., Хаймович И.Н. Разработка информационных систем управления конструкторско-технологической подготовкой производства как интегрированной базы информационных и функциональных структур // Кузнечноштамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008. № 3. С. 34–41.

4 Ковалькова Е. А., Хаймович И. Н. Автоматизация проектирования документоориентированных процессов конструкторско-технологической подготовки производства // Вестник Международного института рынка. 2016. № 1. С. 199-205.

5 Хаймович И. Н. Применение методологии SADT при моделировании бизнес-процессов технологической подготовки производства машиностроительного предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2008. № 3. С. 933-939.

6 Хаймович И. Н. Разработка производственной среды при внедрении информационных систем конструкторско-технологической подготовки производства в условиях ограничения по ресурсам. Самара: СНЦ РАН. 2007. 187 с.

7 Chumak V. G., Ramzaev V .M., Khaimovich I. N. Challenges of data access in economic research based on big data technology // CEUR Workshop Proceedings Proceedings of International Conference Information Technology and Nanotechnology (ITNT 2015). 2015. С. 327-337.

8 Работа в едином информационном пространстве под управлением PDM – системы SmarTeam: метод. указания к лаб. работам / Сост.: М.В. Хардин, И.Н. Хаймович, А.И. Хаймович, А.Ю. Шляпугин. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. 52 с.

9 Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Интегрированная система управления дискретным машиностроительным производством на платформе 1с: УПП // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–12. С. 2558–2562.

10 Герасимов Б. Н. Развитие процесса управления операционной политикой предприятия // Вестник Международного института рынка. 2015. № 1. С. 49-58.

11 Рамзаев В. М., Хаймович И. Н., Чумак П. В. Управление инвестиционными проектами при проведении энергомодернизаций предприятий в регионе// Экономические науки. 2013. № 101. С. 109-113.

Ураскин Евгений Александрович, аспирант, uraskinevgeniy@mail.ru, Россия, Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва,

Хаймович Ирина Николаевна, д-р техн. наук, профессор, Россия, Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва

ORGANIZATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION BASED ON THE SMARTEAM PDM-SYSTEM

E.A. Uraskin, I.N. Khaymovich

This article is devoted to the study of the organization of technological preparation of production using the SmarTeam PDM-system. The purpose of the work was to study the problems of enterprises when implementing product data management systems and identify SmarTeam's capabilities to solve these problems. The article analyzes the main problems and approaches to product data management. It is shown that the SmarTeam PDM-system is able to solve many of these problems, including insufficient coordination between departments, the lack of a single information repository, the complexity of updating and monitoring data. Further, the SmarTeam implementation methodology at the enterprise is proposed, which includes the definition of stages and sequence of actions, employee training and monitoring of the implementation process. Specific examples of the use of SmarTeam to improve the technological preparation of production are given. In conclusion, the importance of implementing SmarTeam to improve the efficiency, accuracy and speed of technological preparation of production is emphasized. The results and recommendations obtained in the framework of the work can be used by enterprises to increase competitiveness and optimize production processes.

Key words: PDM-system, technological preparation of production, products, business processes.

Uraskin Evgeny Alexandrovich, postgraduate, uraskinevgeniy@mail.ru, Russia, Samara, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev,

Khaimovich Irina Nikolaevna, doctor of technical sciences, professor, Russia, Samara, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev

УДК 004.451.25
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-168-169

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССОВ ПЛАНИРОВАНИЯ И СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ

В.С. Скрябин, А.А. Бурлаков, Е.В. Комаров, В.А. Питенко, А.И. Муравьев

В статье представлены результаты проведенного расчета показателей эффективности информационной поддержки процесса планирования и системы информационной поддержки процесса планирования: своевременности, производительности, обоснованности, ресурсопотребления, скрытности и безопасности.

Ключевые слова: процесс планирования, информационно-вычислительная поддержка, система информационной поддержки.

Как было показано в [1, 2], в качестве основных свойств процесса планирования могут быть рассмотрены своевременность, обоснованность, ресурсопотребление и скрытность информационной поддержки процессов планирования (ИППП), а также производительности, ресурсопотребления и безопасности системы информационной поддержки (СИП).

А. Расчет показателей своевременности ИППП и производительности СИП.

Проведенный расчет времени выполнения работ планирования должностными лицами (ДЛ) оказал, что при использовании СИП для информационной поддержки работы ДЛ вследствие сокращения времени реализации отдельных операций, исключения некоторых рутинных работ, распараллеливания работ планирования (в качестве средства выполнения параллельных работ выступает персональная ЭВМ), предоставлении удобной среды работы, интеграции данных, процедур, методик длительность $T_{кр\ i}$ значительно сокращается (по сравнению с существующей технологий или автоматизацией только отдельных информационных задач планирования).

На основе данных о содержании и времени выполнения работ планирования ДЛ при существующей технологии информационной поддержки и при использовании СИП составлены сетевые графы работ, причем, для существующей технологии информационной поддержки процессов ПС расчет проводился для варианта выполнения

работ планирования двумя ДЛ и варианта, когда работы выполняются максимально возможным количеством ДЛ. При использовании СИП для выполнения работ планирования было задействовано одно ДЛ и одна персональная ЭВМ. Можно сделать вывод, что применение СИП дает существенный выигрыш по своевременности выполнения работ планирования относительно существующей технологии, причем, вариант использования неограниченного количества ДЛ для решения задач планирования показал свою несостоятельность (весьма незначительное сокращение времени цикла планирования при существенном увеличении ресурсопотребления и ухудшении значения показателя скрытности). Для различных условий планирования оценка относительного улучшения своевременности составила 1,5÷3,3 раза (для отдельных этапов планирования). При этом на каждом из этапов дополнительное время, перераспределяемое в пользу творческих процессов принятия решений, составило (0,3÷1,6)·времени выполнения работ планирования *i*-го этапа.

Эффект от применения предложенной методики по показателю времени выполнения нетворческих информационных процедур составляет, для различных этапов, 1,46÷3,28 раза.

Эффект по показателю времени получения информации, в зависимости от применяемого вида поиска по отношению к существующей технологии ИППП, составляет от 6 до 60 раз. Причем, проведенный расчет показал, что при необходимости получения небольшого числа информационных кадров, на небольшую глубину поиска по связям, более рационально воспользоваться функцией поиска по статическим связям. При необходимости получения всей необходимой информации по интересующему вопросу целесообразно использовать функцию поиска сети, образованной динамическими связями.

Таблица 1

Оценка своевременности ИППП и производительности СИП

Показатели		Требуемое значение	Значение, полученное при использовании существующей методики	Значение, полученное при использовании предложенной методики	Эффект от применения предложенной методики (раз)
$T_{ипi}$	I этап	≈2,1-2,6 ч.	≈2,1 ч.	≈1,44 ч.	≈1,46
	II этап	≈2,1-2,6 ч.	≈2,6 ч.	≈1,68 ч.	≈1,55
	III этап	≈6-6,8 ч.	≈6,3 ч.	≈5,04 ч.	≈1,25
	VI этап	≈5,2-7,4 ч.	≈5,25 ч.	≈1,6 ч.	≈3,28
Время получения информации	$t_{писс}$	1 мин.	≈1-20 мин.	≈10-30 сек.	≈9-60
	$t_{пидс}$			≈15-25 сек.	≈6-45
	$t_{пд}$			≈15-20 сек.	≈6-30
	$t_{пит}$			≈5-30 сек.	≈6-45
$t_{ои}$		1-10 мин.	≈1-15 мин.	≈0,1-3,2 мин.	≈2-6
$t_{рд}$		-	≈20-180 мин.	5-30 мин.	≈4-6
V_i		≈1	≈0,3-0,7	≈1	≈1,4-3,3

Эффект по показателю времени обработки информации в зависимости от объема и сложности выполняемых работ, применяемого вида поиска составляет от 2 до 6 раз.

Выигрыш по показателю времени исполнения документов, в зависимости от степени сложности и объема документа, составляет 4÷6 раз.

Оценка производительности СИП проводилась с использованием имитационной модели системы, разработанной для ручного способа запроса информации и для случая использования методики информационной поддержки процессов планирования. Результаты моделирования показали, что использование СИП позволяет обеспечить значение коэффициента оперативной скорости исполнения близким к 1.

Полученные показатели сведены в табл.1.

Б. Расчет показателей обоснованности ИППП.

Оценка обоснованности ИППП проводится по показателям адекватности разработки документов, полноте и точности предоставляемой ДЛ информации.

Адекватность разработки документов оценивается вероятностью ошибки ($P_{ош}$) и проводится на основе учета того, что основными источниками ошибок и отказов в результате информационной поддержки процесса формирования документов являются ошибки исходных данных, ошибки ДЛ, ошибки в программе и отказы (сбои) аппаратных средств за время работы программы.

Известны значения показателей, характеризующих эти источники: вероятность ошибки в исходных данных на один символ текстового или табличного документа $P_Д = 10^{-8} - 10^{-9}$ [3]; вероятность ошибки ДЛ на один символ текстового или табличного документа $P_{ДЛ} = 10^{-4} - 10^{-5}$ [3]; вероятность ошибки в программе на один оператор программы $P_П = 10^{-5}$ [3]; среднее время наработки на отказ (сбой) средств автоматизации управления $T_о = 300$ ч. (для данного класса ЭВМ, дано в ТТХ). Из последнего показателя можно получить (в предположении экспоненциального закона распределения интервала времени между появлением отказов (сбоев)) вероятность возникновения отказа (сбоя) в программе за время работы программы по формуле:

$$P_A(t_P) = 1 - \exp^{-\frac{t_р}{T_о}}$$

Тогда вероятность ошибки составит $P_{ош}=2{,}8\cdot10^{-3}$. Эффект от применения СИП по показателю вероятности ошибки в документах разрабатываемых в процессе планирования связи достигает от 100 до 150 раз.

Для проведения расчетов по показателям полноты и точности предоставляемой ДЛ информации применен метод статистических выборок на экспериментальном информационном хранилище макета СИП. При этом для вычисления коэффициентов точности и полноты было проведено 10 серий по 100 запросов в каждой. Каждая серия различалась как общим объемом информационных кадров, находящихся в базе данных СИП, так и количеством релевантных кадров в каждой серии.

В результате проведенных расчетов получены графики зависимости коэффициентов точности и полноты (рис.1).

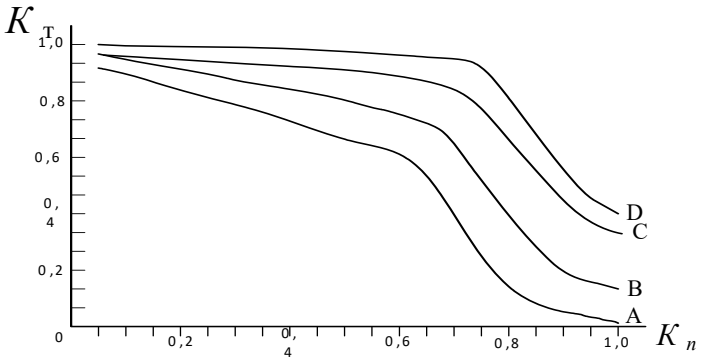


Рис. 1. Графики зависимости коэффициентов точности и полноты предоставляемой ДЛ информации: График А – соответствует наличию в информационном хранилище 2% релевантных информационных блоков; график В – соответствует наличию в информационном хранилище 10% релевантных информационных блоков; график С – соответствует наличию в информационном хранилище 40% релевантных информационных блоков; график D – соответствует наличию в информационном хранилище 60% релевантных информационных блоков

На основании данных графиков можно сделать вывод, что область на графике, соответствующая $K_П$ = 0,2÷0,45, характеризующаяся специфичностью запроса, а при $K_П$ = 0,6÷0,95 ДЛ получают исчерпывающую информацию на запрос (т.е. в ответе присутствуют как релевантные, так и не релевантные информационные блоки). В то же время на основании данных графиков можно заключить, что при значениях полноты 0,6÷0,95 значения точности колеблются в пределах 0,55÷0,85. Таким образом, при использовании методики автоматизированной работы ДЛ при планировании на СИП можно повысить значения коэффициентов полноты и точности в 1,04÷1,2 раза, что сделает работу ДЛ более эффективной.

В. Расчет показателей ресурсопотребления ИППП и СИП.

Большое разнообразие задач информационной поддержки работы ДЛ, методов их решения и способов программной реализации заставляет ограничиться определением только показателей трудоемкости информационных процессов планирования и оценить показатели ресурсопотребления в целом только для исследованных подпроцессов информационной поддержки планирования и компонентов СИП. Оценим трудоемкость ИППП на основе значений коэффициентов автоматизации информационных задач ПС ($k_а$), загрузки ДЛ ($k_з$) и темповой напряженности ДЛ ($k_т$) для ручной и автоматизированной технологий планирования. Эти оценки являются экспертно-аналитическими и получены при анализе графа работ по планировнию и на основе эксперимента на макете СИП:

$k_{а\,РТ} \approx 0{,}1$; $k_{а\,ЧА} \approx 0{,}21$; $k_{а\,ГМТ} \approx 0{,}38$; $k_{з\,РТ} \approx 0{,}99$; $k_{з\,ЧА} \approx 0{,}93$; $k_{з\,ГМТ} \approx 0{,}83$; $k_{т\,РТ} \approx 1{,}92$; $k_{т\,ЧА} \approx 1{,}38$; $k_{а\,ГМТ} \approx 0{,}38$.

Расчеты показали существенное снижение трудоемкости работы ДЛ при использовании СИП:

1) выигрыш по коэффициенту автоматизации $Э_а = k_{а\,ГМТ} / k_{а\,РТ} \approx 2{,}1 \div 3{,}2$;

2) выигрыш по коэффициенту загрузки ДЛ $Э_з = k_{з\,ГМТ} / k_{з\,РТ} \approx 1{,}1 \div 1{,}2$;

3) выигрыш по коэффициенту темповой напряженности $Э_т = k_{т\,ГМТ} / k_{т\,РТ} \approx 1{,}2 \div 2{,}2$.

Г. Расчет показателей скрытности ИППП и безопасности СИП.

Проведенная оценка скрытности ИППП для 360 часов среднего времени планирования (из расчета 15 АРМ в течении 24 часов), среднего времени ввода одного варианта пароля равному 10 сек. и 10 символов в коде пароля вероятность несанкционированного доступа составит $P_{нсд} = 5 \cdot 10^{-12}$, что удовлетворяет предъявляемым требованиям. При необходимости можно задать требование двойного ввода пароля, что существенно снизит вероятность несанкционированного доступа.

Таким образом, исходя из проведенной оценки эффективности ИППП и СИП по внутренним показателям, можно сделать вывод об эффективности применения методики информационной поддержки работы ДЛ при планировании на основе СИП, позволяющей получить значительный выигрыш по основным показателям существенных свойств.

Список литературы

1. Мякотин А.В., Бурлаков А.А., Моргунов А.Я., Питенко В.А., Муравьев А.И. Требования к информационно-вычислительной поддержке процесса планирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 2. С. 124-128.

2. Мякотин А.В., Бурлаков А.А., Комаров Е.В., Питенко В.А., Муравьев А.И. Показатели своевременности информационной поддержки процесса планирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 3. С. 278-282.

3. Котенко И.В. Теория и практика построения автоматизированных систем информационной и вычислительной поддержки процессов планирования связи на основе новых информационных технологий. Монография. СПб.:DEC, 1998. 404 с.

Скрябин Виктор Сергеевич, преподаватель, 3944550@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого,

Бурлаков Андрей Анатольевич, канд. воен. наук, доцент, burlakov38@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого,

Комаров Евгений Владимирович, канд. воен. наук, доцент, преподаватель кафедры, komarovv53@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого,

Питенко Валерий Александрович, старший, valalpit@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого,

Муравьев Александр Иванович, преподаватель, muravjev.a1@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого

CALCULATION OF PERFORMANCE INDICATORS INFORMATION SUPPORT PLANNING PROCESSES AND SYSTEMS INFORMATION SUPPORT

V.S. Skrybin, A.Ya. Morgunov, E.V. Komarov, V.A. Pitenko, A.I. Muravyev

The article presents the results of the calculation of the indicators of the effectiveness of information support for the planning process and the system of information support for the planning process: timeliness, productivity, validity, resource consumption, secrecy and security.

Keyw ords: planning process, information and computing support, information support system.

Skrybin Viktor Sergeevich, lecturer, 3944550@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny,

Burlakov Andrey Anatolyevich, candidate of military sciences, docent, burlakov38@gmail.com, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny,

Komarov Evgeny Vladimrovich, candidate of military sciences, lecturer, docent, komarovv53@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny,

Pitenko Valery Aleksandrovich, senior lecturer, valalpit@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications., Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny,

Muravyev Alexander Ivanovich, lecturer, muravjev.a1@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, M Military Academy of Communications named after S.M. Budyonny

УДК 004.94
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-171-172

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ГРАФИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОДЕЛИ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ СРЕДСТВ В ЭЛЕМЕНТАХ ИНСТРУМЕНТАРИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Галанкин, С.В. Чащин, Д.Н. Сизов

Стремительное возрастание роли космических средств – одна из основных тенденций развития вооруженной борьбы в настоящее время. Интенсивное внедрение новых информационных технологий в военную сферу приводит к существенному возрастанию зависимости военных действий на суше, в воздухе и на море от действий в космосе. Реализация принципа мобильности проявляется в создании и принятии на вооружение соответствующих подвижных средств. Эффективность их применения в условиях возможного воздействия по ним противника в значительной мере будет зависеть от способности командиров и штабов по обоснованному и своевременному принятию решений по оперативному управлению подвижными средствами. С этой целью разрабатываются математическое и программное обеспечения соответствующих автоматизированных систем управления.

Ключевые слова: моделирование передвижения подвижных средств, тактические свойства местности, инструментарий моделирования, схемы графического представления.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности решения задач подвижными средствами (ПС) по предназначению является использование органами управления ПС адаптивных способов организации их применения и методов планирования с использованием современных технологий управления войсками, в частности, основанных на цифровых картах местности. Это позволит гибко реагировать на изменения обстановки для достижения максимальной эффективности решения задач управления ПС в различных условиях обстановки.

Важным направлением решения этих задач является разработка и использование программно-моделирующих средств поддержки принятия решения, позволяющих обеспечить моделирование и автоматизацию процессов решения задач, входящих в состав цикла управления ПС (от оценки обстановки до контроля выполнения принятых решений) [2]. Данная статья является развитием [5], в которой представлена модель передвижения подвижных средств в условиях возможного соприкосновения с противником с учетом необходимых тактических свойств местности.

По результатам сравнительного анализа подходов к проектированию информационных систем был сделан вывод о необходимости выбора объектно-ориентированного подхода при разработке специализированного инструментария моделирования применения подвижных средств и применение в его рамках идеологии и основных типов элементов унифицированного языка моделирования.

Разработка инструментария моделирования применения ПС на местности с использованием цифровой информации о местности на основе выше обозначенных идеологии и основных типов элементов включает в себя несколько этапов:

– разработка словаря элементов инструментария моделирования (ИМ);

– разработка графических нотаций элементов ИМ;

– разработка схем графического представления (СГП).

Согласно традиционной схеме [3], концепцию взаимосвязей элементов средства моделирования как сложной системы, а, следовательно, и технологию перехода от моделируемой системы к ее машинной модели можно представить следующим образом:

1. Объекты моделирования описываются (отображаются в языке) с помощью некоторых атрибутов.
2. Атрибуты взаимодействуют с процессами, адекватными реально протекающим явлениям в моделируемой системе.
3. Процессы требуют конкретных условий, определяющих логическую основу и последовательность взаимодействия этих процессов во времени.
4. Условия влияют на события, имеющие место внутри объекта моделирования и при взаимодействии с внешней средой.
5. События изменяют состояния модели системы в пространстве и во времени.

Необходимый и достаточный набор элементов ИМ для описания моделируемой системы следующий: класс, связь, условие, событие, состояние [4].

Классы представляют собой описание совокупности объектов с общими атрибутами, операциями, отношениями и семантикой. Графически класс изображается в виде прямоугольника, который разделен на три раздела. В первом разделе записывается имя класса, во втором атрибуты и в третьем – операции.

В объектно-ориентированном интерактивном языке описания моделирования ситуаций выделяются три типа наиболее важных связей (отношений): поведенческие, иерархические, и структурные. Поведенческие отношения – это отношения использования, согласно которому изменение в спецификации одного элемента может повлиять на другой элемент, его использующий, причем обратное не обязательно. Графически поведенческие отношения изображаются пунктирной линией со стрелкой, направленной от данного элемента на тот, от которого он зависит. Иерархические отношения – это отношение между общей сущностью и ее конкретным воплощением. Графически отношение обобщения изображается в виде линии с большой не закрашенной стрелкой, направленной на родителя. Структурным отношением называется отношение, показывающее, что объекты одного типа неким образом связаны с объектами другого типа. Если между двумя классами определена структурная связь, то можно перемещаться от объектов одного класса к объектам другого. Графически структурная связь изображается в виде линии, соединяющей класс сам с собой или с другими классами.

Если переход помечен конструкцией условия, то он происходит только тогда, когда в момент возникновения события условие истинно. Условие остается истинным на протяжении конечного промежутка времени [5].

Состояние описывает некоторую конкретную ситуацию, характеризуемую протяженностью во времени. Теоретически переход в новое состояние занимает нулевое время. На практике время, необходимое для перехода в новое состояние, пренебрежимо мало по сравнению со временем, проведенным в данном состоянии. Начальное состояние — это то состояние, в котором оказывается схема графического представления состояний сразу после активизации. Графически состояние представляет собой овал с текстом описания состояния внутри овала.

Событие — это описание существенного факта, который занимает некоторое положение во времени и в пространстве. Графически событие представляется как прямоугольник с закруглениями вместо вершин и с текстом описания события внутри. События могут быть внутренними или внешними. Внешние события передаются между моделируемой системой (например: группа космической поддержки) и внешними по отношению к ней силами. Например, воздействие противника или на противника (делится в соответствии со способом воздействия: радиоэлектронное подавление, артобстрел, ядерный удар и т.д.), природное воздействие (в соответствии с выше указанными классами), состояние здоровья военнослужащих рассматриваемого воинского формирования и т.д. Внутренние события инициируют взаимодействие между объектами, существующими внутри самой системы. Например, события зависящие от деятельности воинских формирований и приданной техники.

На рис. 1 представлен разработанный в целях решения задач моделирования применения ПС агрегированный перечень элементов ИМ всех пяти типов.

Для описания модели передвижения ПС в условиях отсутствия соприкосновения с противником, представленной на рис. 2, используются три родительских класса: «Войсковое формирование», «Информация о местности» и «Климатические и метеоусловия». В данных классах содержится начальная информация необходимая для дальнейших расчетов.

Особенностью СГП передвижения ПС в условиях отсутствия соприкосновения с противником является использование связи-условия, которая характеризует информационный обмен между классом «Тактические свойства местности (ТСМ)» и событием «Расчет требуемых временных ресурсов и ресурсов военно-технического порядка для изменения ТСМ». Данный вид связи введен с целью возможности учета, как всех ТСМ в совокупности, так и отдельных видов ТСМ. Графическое представление связи-условия выглядит как связь с помещенным на нее по центру ромбом, в котором указана ограничивающая информация. В рассматриваемом случае ограничение накладывается на рассмотрение только трех ТСМ из семи, описанных в [1], это «Проходимость», «Маскировочные свойства местности» и «Защитные свойства местности» согласно перечню соотнесения условных обозначений ТСМ и самих ТСМ при использовании их в ИМ:

П – проходимость;

В – условия ведения огня;

М – маскировочные свойства местности;

З – защитные свойства местности;

О – условия ориентации;

Н – условия наблюдения;

И – условия инженерного оборудования местности.

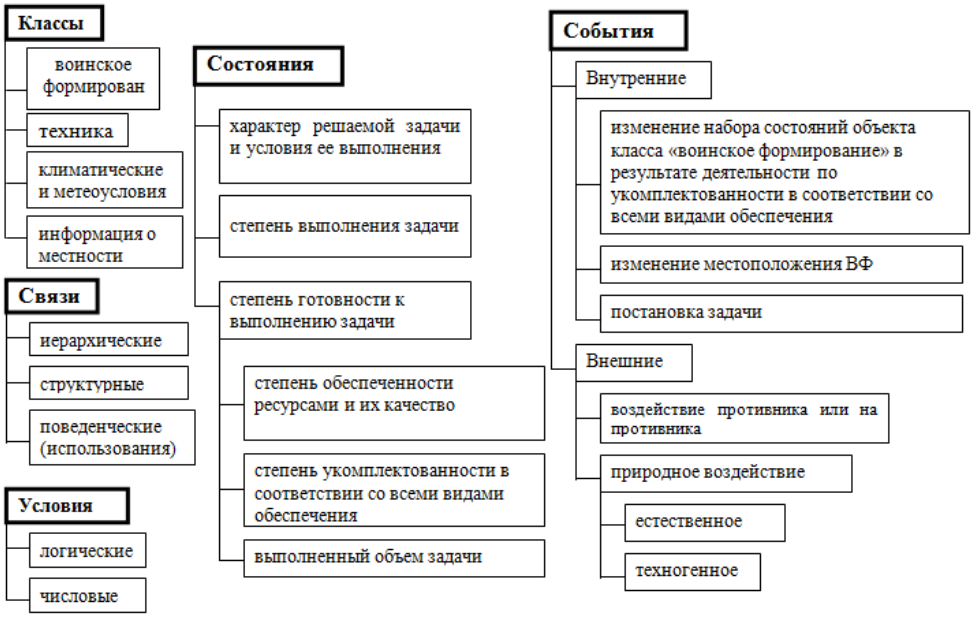


Рис. 1. Агрегированный перечень элементов ИМ, разработанный в целях решения задач моделирования применения ПС

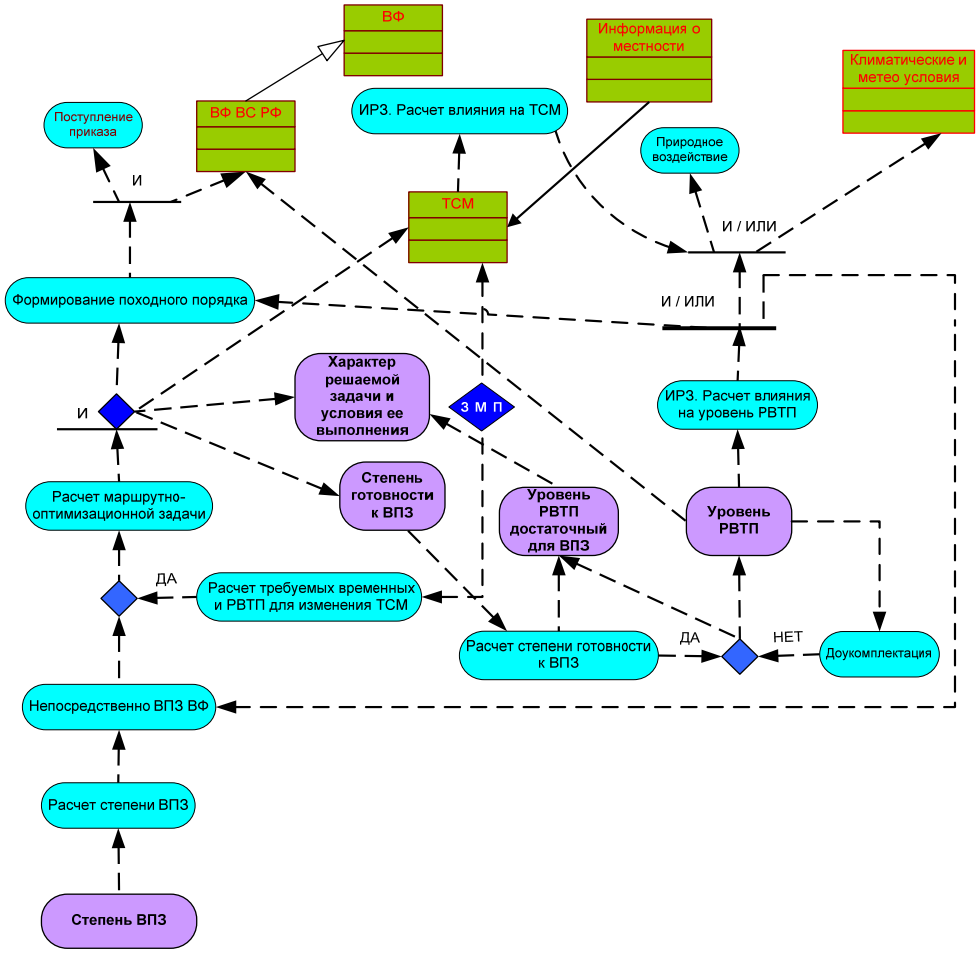


Рис. 2. Схема графического представления передвижения ПС в условиях отсутствия соприкосновения с противником в элементах ИМ

ТСМ в связи-условии прописываются подряд через пробел, если ромб не содержит записи о ТСМ это означает, что должны учитываться все ТСМ.

СГП класса «Тактические свойства местности» в элементах ИМ (рис. 3) представлена в виде одного родительского класса и семи классов-потомков, обеспечивающих расчет основных ТСМ. Родительский класс содержит все основные атрибуты и операции (методы), используемые классами-потомками для расчетов.

ТСМ используются для представления в элементах ИМ более сложной модели передвижения ПС в условиях возможного соприкосновения с противником с учетом необходимых ТСМ, представленной на рис. 4. При описании данного представления в элементах ИМ в основную модель добавляются пакеты, осуществляющие учет действий противника, а так же воздействия ТСМ на ПС и противника.

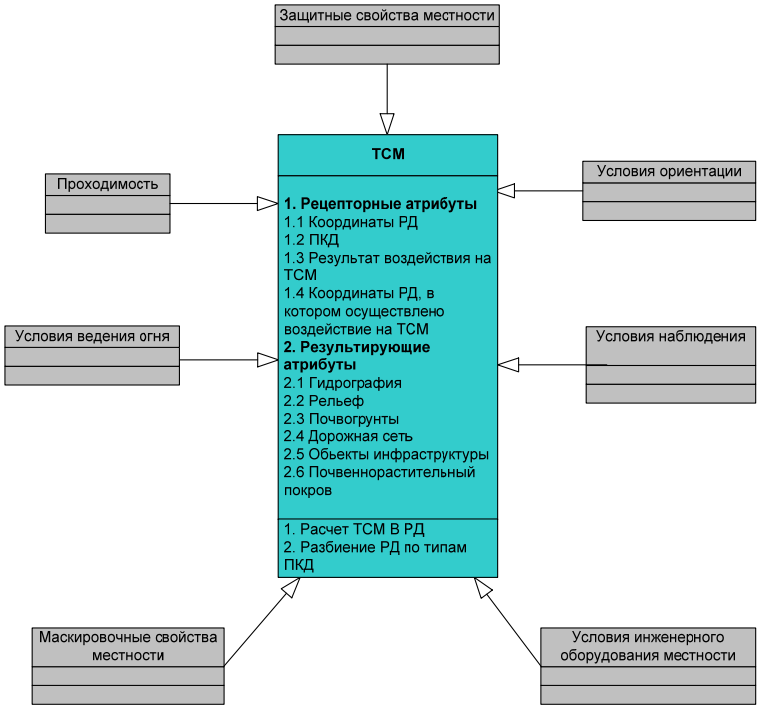


Рис. 3. Схема графического представления класса «Тактические свойства местности» в элементах ИМ

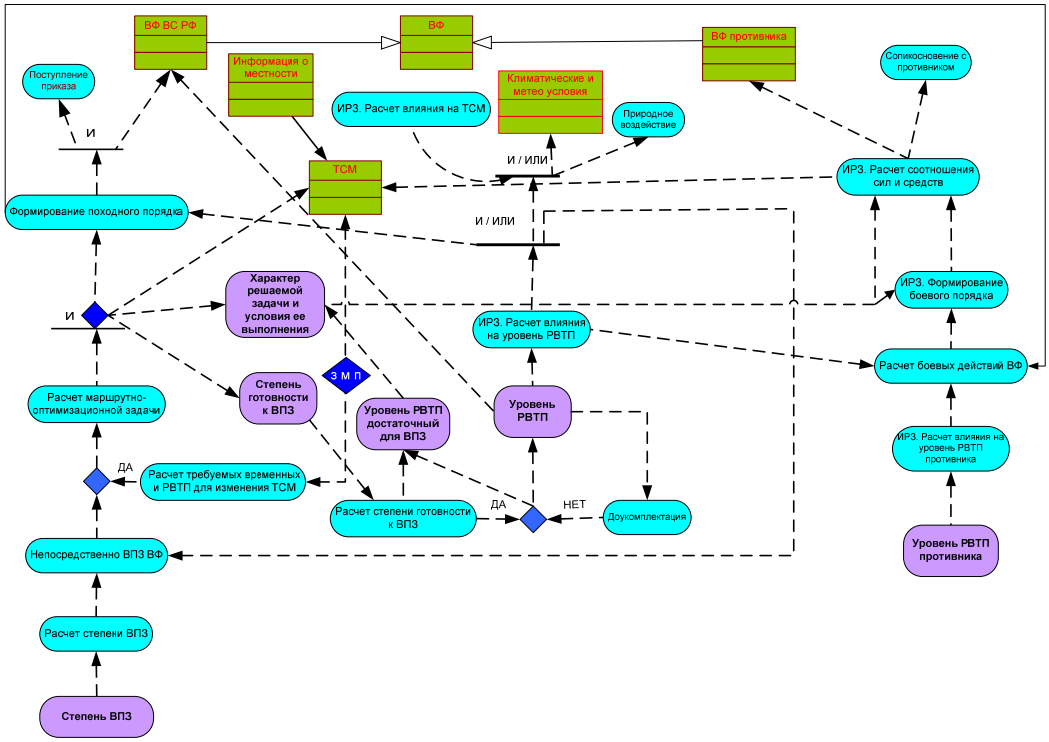


Рис. 4. Схема графического представления передвижения ПС в условиях возможного соприкосновения с противником с учетом необходимых ТСМ в элементах ИМ

Таким образом, в данной статье осуществлено представление разработанной в [5] модели передвижения ПС в условиях возможного соприкосновения с противником с учетом необходимых ТСМ, а также модели передвижения ПС в условиях отсутствия соприкосновения с противником с учетом необходимых ТСМ в виде СГП в элементах ИМ. Необходимо отметить, что изложенный в настоящей статье способ графического представления в элементах инструментария моделирования применим и ко многим другим задачам, требующих автоматизации деятельности управляющих органов.

Список литературы

1.Псарев А.А., Коваленка А.Н., Куприн А.М. и др. Военная топография. Учебник. М.: Воениздат, 1986. 384 с.

2.Волков В.Ф., Галанкин А.В., Цыбрин В.Г. и др. Автоматизированные системы управления войсками. Учебник. СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2010. 391 с.

3.Советов Б.Я. Моделирование систем. Учебник. 7-е изд. М.: Издательство Юрайт, 2015. 343 с.

4.Акобсон А., Буч Г., Рамбо Дж. «Унифицированный процесс разработки программного обеспечения». СПб.: Питер, 2002.

5.Галанкин А.В., Негодин Д.В. Разработка модели передвижения подвижных средств в условиях возможного соприкосновения с противником с учетом тактических свойств местности// Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2020. Вып. 2. С. 203-210.

Галанкин Андрей Вячеславович, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры, biruk98@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Чащин Сергей Васильевич, старший преподаватель, sonpo123@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Сизов Даниил Николаевич, помощник начальника строевого отдела, hasl_danil@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

DEVELOPMENT OF A DIAGRAM OF GRAPHIC REPRESENTATION OF A MODEL OF MOVEMENT OF MOVING VEHICLES IN THE ELEMENTS OF MODELING TOOLS

A.V. Galankin, S.V. Chachin

The rapid growth of the role of space assets is one of the main trends in the development of armed struggle at the present time. The intensive introduction of new information technologies into the military sphere leads to a significant increase in the dependence of military operations on land, in the air and at sea on operations in space. The implementation of the principle of mobility is manifested in the creation and adoption of appropriate mobile equipment. The effectiveness of their use under conditions of possible enemy influence on them will largely depend on the ability of commanders and staffs to make reasonable and timely decisions on the operational control of mobile assets. For this purpose, mathematical and software software for the corresponding automated control systems are being developed.

Key words: modeling of the movement of mobile vehicles, tactical properties of the terrain, modeling tools, graphical representation schemes.

Galankin Andrey Vyacheslavovich, candidate of technical science, deputy head of the department, biruk98@gmail.com, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Chashchin Sergey Vasilyevich, senior lecturer of the department, sonpo123@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaysky Military Space Academy,

Sizov Daniil Nikolaevic, assistant head of the military department, hasl_danil@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaysky Military Space Academy

УДК 623.1/.7
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-175-176

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ОЦЕНИВАНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ОПЕРАТИВНОЙ ГОТОВНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА В СОСТАВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГРУППИРОВКИ

А.А. Закутаев, А.В. Емельянов, А.А. Качалин, С.В. Барякшев

Для сложного радиотехнического средства, обладающего принятыми эксплуатационными характеристиками, разработана схема надежности. Проведен анализ особенностей существующего научно-методического аппарата оценивания коэффициента оперативной готовности радиотехнического средства. Предложен способ оценивания вышеуказанного коэффициента для радиотехнического средства в составе распределенной группировки с учетом формирования групповых комплектов ЗИП.

Ключевые слова: радиотехническое средство, надежность, коэффициент оперативной готовности, групповой ЗИП.

Активное освоение околоземного космического пространства привело к созданию большого количества радиолокационных и квантово-оптических средств, использующихся для обеспечения связи, навигации, передачи энергии и решения многих других задач [1]. Высокие требования к характеристикам указанных средств привели к значительному усложнению как самих изделий, так и обеспечения процесса их эксплуатации. Исследованиям в области поиска оптимальных вариантов организации процесса эксплуатации радиотехнических средств (РТС) в условиях необходимости минимизации его стоимости и поддержания требуемого уровня надежности в настоящее время посвящено достаточно большое количество работ [2-5]. Вместе с тем, разработанные подходы в основном

ориентированы на отдельно взятые образцы РТС и не учитывают особенностей, связанных с эксплуатацией их распределенных группировок. Одна из тенденций создания указанных группировок заключается в определении порядка формирования групповых комплектов ЗИП. Таким образом, исследование подходов к расчету различных показателей надежности, например коэффициента оперативной готовности, радиотехнических средств в составе распределенных группировок и разработка соответствующих моделей является актуальной научно-технической задачей.

Анализ влияния эксплуатационных характеристик радиотехнических средств, являющихся сложными техническими системами, на их надежность

В работе под радиотехническим средством понимается широкий круг радиолокационных и квантово-оптических средств (РЛС и КОС), функционирование которых основано на передаче энергии на большие расстояния. В большинстве случаев указанные средства состоят из совокупности функционально независимых модулей, объединенных для выполнения целевой задачи. Сложность решаемых задач, а также процессов управления, контроля и диагностики РЛС и КОС обуславливает необходимость включения в их состав средств вычислительной техники. Указанные особенности позволяют рассматривать подобные РЛС и КОС, как сложные технические системы.

При проведении исследований, результаты которых представлены в работе, были приняты следующие допущения:

- по определенности назначения, РТС является изделием конкретного назначения, имеющее один основной вариант применения по целевому назначению;
- по числу возможных (учитываемых) состояний (по работоспособности) РТС отнесено к виду I в соответствии с [6], когда в процессе эксплуатации оно может находиться в двух состояниях: работоспособном или неработоспособном. При этом возможно условное разделение множества частично неработоспособных состояний на два подмножества состояний, одно из которых относят к работоспособному, а другое к неработоспособному состоянию. При этом разделение множества состояний на два подмножества выполняется согласно правилу: если в частично неработоспособном состоянии целесообразно продолжать применять РТС по назначению, то это состояние относят к работоспособному, в противном случае – к неработоспособному;
- по режимам применения (функционирования) РТС классифицировано как изделие многократного циклического применения (с возможным предшествующим периодом ожидания применения и/или хранения).
- по возможности восстановления работоспособного состояния после отказа в процессе эксплуатации РТС является восстанавливаемым.
- по возможности и способу восстановления технического ресурса (срока службы) путем проведения ремонтно-восстановительных работ (РВР) РТС является ремонтируемым необезличенным способом;
- по возможности технического обслуживания в процессе эксплуатации РТС является обслуживаемым;

В связи с наличием в составе РТС подсистем, содержащих средства (устройства) вычислительной техники, оно было отнесено к классу изделий с отказами сбойного характера (сбоями).

С учетом принятой структуры РТС структурная схема его надежности может быть представлена в виде совокупности модулей *Ni*, описываемых выбранным показателем (рис. 1).

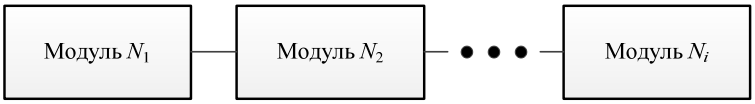


Рис. 1. Структурная схема надежности типового РТС

В общем случае надежность РТС как сложной технической системы может оцениваться такими показателями, как: коэффициент оперативной готовности, вероятность безотказной работы при наработке, коэффициент готовности и т.д. [7]. Указанные показатели обеспечиваются следующими способами:

- конструктивным, включающим соблюдение требований к:

а) структуре и составу ЗИП;

б) системе автоматического контроля технического состояния изделия и его СЧ;

в) способам и средствам обеспечения ремонтопригодности и сохраняемости;

г) номенклатуре стандартизованных или унифицированных комплектующих изделий и др.

- технологическим, обеспеченным:

а) точностными параметрами технологического оборудования и его аттестацией;

б) требованиями к стабильности технологических процессов, свойствам сырья, материалов, комплектующим изделиям;

в) требованиями к способам и средствам контроля уровня надежности (дефектности) в ходе производства и др.,

- эксплуатационным, включающим:

а) систему технического обслуживания и ремонта;

б) алгоритмы технического диагностирования (контроля технического состояния);

в) систему обучения (подготовки) обслуживающего персонала;

г) способы устранения отказов и повреждений;

д) порядок использования ЗИП, правила регулировок;

е) систему сбора информации о надежности, регистрируемой в ходе опытной и штатной эксплуатации, и др.

Анализ имеющегося научно-методического задела в области оценивания надежности радиотехнических средств

В работе [8] для оценивания надежности РТС был выбран такой комплексный показатель, как коэффициент оперативной готовности $K_{\text{ОГ РТС}}$. Модель его расчета представлена в виде функциональной зависимости:

$$K_{\text{ОГ РТС}} = f\left(T_{\text{ТО}}, T_{\text{В}}, T_{\text{об}}, \lambda\right), \tag{1}$$

где $T_{\text{ТО}}$ – время технического обслуживания; $T_{\text{В}}$ – время восстановления; $T_{\text{об}}$ – время обслуживания.

Очевидно, что РТС как сложная техническая и отказоустойчивая система обладает некоторым уровнем избыточности, позволяющим накапливать соответствующее этому уровню количество отказов элементов, не приводя к отказу системы в целом. Для восстановления требуемого уровня избыточности, утраченной из-за возникновения неисправностей, проводится техническое обслуживание РТС, в рамках которого осуществляется полный контроль его технического состояния. В случае обнаружения неисправностей и (или) отказов на изделии проводятся РВР, восстанавливающие ресурс отказавшего элемента. Восстановление заключается в замене отказавшего элемента или в установке параметра в соответствующее поле допусков. Формальное описание такого процесса эксплуатации в работе [8] представлено полумарковской моделью, граф которой представлен на рисунке 2.

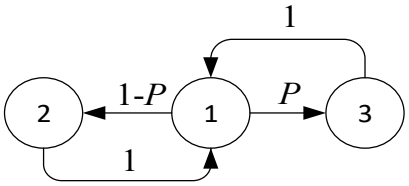


Рис. 2. Граф состояний для математической модели процесса эксплуатации РТС в месте дислокации как обслуживаемой системы, вершины: 1 – работоспособное состояние; 2 – техническое обслуживание; 3 – неработоспособное состояние

На рисунке 2 P – вероятность возникновения отказа РТС в месте дислокации. Для нормального участка процесса эксплуатации в месте дислокации зависимость интенсивности отказов от времени будет постоянной ($\lambda(t)$ = const), а выражение для расчета вероятности возникновения отказа РТС имеет вид [8]:

$$P = 1 - \exp\left(-\lambda T_{\text{об}}\right).$$

С учетом принятых в работе [8] допущений значение стационарного распределения вероятностей состояний рассчитывается в соответствии с выражением:

$$\Omega_i = \frac{P_i m_i}{\sum\limits_{j=1}^{3} P_j m_j}.$$

где P_i – вероятность нахождения системы в i-ом состоянии, определяемое на основе решения системы уравнений:

$$\begin{cases} P_1 = P_2 + P_3, \\ P_2 = P_1(1-P), \\ P_3 = P_1 P\ , \\ P_1 + P_2 + P_3 = 1; \end{cases}$$

m_i – среднее время пребывания системы в i-ом состоянии, определяемое как:

$$\begin{cases} m_1 = \dfrac{1}{\lambda}\left[1 - \exp\left(-\lambda T_{\text{об}}\right)\right], \\ m_2 = T_{\text{ТО}}, \\ m_3 = T_{\text{ТО}} + T_{\text{В}}. \end{cases}$$

Показателем эффективности такого процесса эксплуатации также будет вероятность нахождения РТС в работоспособном состоянии. Но эта вероятность уже будет функцией периода и продолжительности обслуживания, т.е. $T_{\text{об}}$ и $T_{\text{ТО}}$ [8]. Выражение для ее расчета с учетом имеет вид [8]:

$$\Omega_1 = \frac{\dfrac{1}{\lambda}P}{\dfrac{1}{\lambda}P + T_{\text{ТО}}\left(R_{\text{ЗИП}}\right) + PT_{\text{В}}\left(R_{\text{ЗИП}}\right)}. \qquad (2)$$

Числитель выражения (2) соответствует средней продолжительности пребывания РТС в работоспособном состоянии, а знаменатель – сумме средних времен пребывания РТС в состоянии работоспособности, обслуживания и восстановления [8]. Исходя из того, что показатель Ω_1 может быть принят в качестве эквивалента коэффициента оперативной готовности, то выражение (1) можно записать в виде:

$$K_{\text{ОГ РТС}} = f\left(T_{\text{ТО}}, T_{\text{В}}, T_{\text{об}}, \lambda\right) = \Omega_1.$$

Следует отметить, что для представленного выражения характерно то, что $T_{\text{В}}$ является функцией достаточности комплектов ЗИП, оцениваемой показателем $R_{\text{ЗИП}}$. Кроме того, от достаточности комплектов ЗИП зависит также продолжительность обслуживания $T_{\text{ТО}}$, т. к. запасные элементы расходуются при устранении неисправностей.

Описание модели расчета коэффициента оперативной готовности радиотехнического средства в составе распределенной группировки

Технологичность и наукоемкость современных и перспективных образцов РТС ведет к увеличению стоимости их разработки и создания. Таже тенденция относится к их элементной базе и, соответственно, к запасным частям. При создании распределенных группировок РТС одним из способов снижения стоимости их эксплуатации является создание групповых комплектов ЗИП-Г. Анализ номенклатуры ЗИП-Г отдельных образцов РТС показал,

что в их состав в основном входят ключевые узлы (блоки) изделия, реализующие выполнение им своих функций по предназначению. Включение указанных элементов в состав ЗИП-Г обусловлено их высокой стоимостью, а также технологичностью.

Исходя из этого может быть принято допущение о том, что в схеме надежности РТС подобные узлы (блоки) будут иметь последовательный характер размещения, а их выход из строя будет приводить к выходу из строя изделия в целом. С учетом принятого допущения схема надежности типового РТС (рисунке 1) примет вид, представленный на рисунке 3.

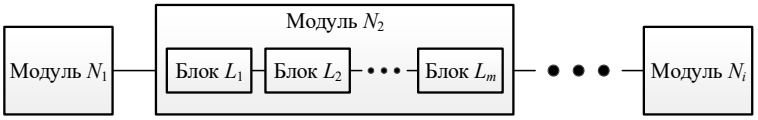


Рис. 3. Схема надежности типового РТС, имеющего в составе ключевые блоки L_m

При таком подходе коэффициент оперативной готовности РТС может быть определен как:

$$K_{\text{ОГ РТС}} = K_{\text{ОГ } N_1} K_{\text{ОГ } N_2} \times \ldots \times K_{\text{ОГ } N_i} \ , \tag{3}$$

где $K_{\text{ОГ } Ni}$ – коэффициенты оперативной готовности i-ого модуля РТС.

Расчет коэффициента оперативной готовности каждого из модулей выполняется с использованием выражения (2). Для модуля РТС, в составе которого находится блок, входящий в состав ЗИП-Г, расчет $K_{\text{ОГ}}$ будет выполняться аналогично выражению (3). При этом, время его восстановления будет комплексной величиной, включающей время, необходимое для проведения работ, а также на доставку блока из пункта хранения ЗИП-Г к месту дислокации РТС.

Рассмотрим порядок расчета $K_{\text{ОГ}}$ блока, входящего в состав ЗИП-Г, на примере блока L_2 РТС, схема надежности которого представлена на рисунке 3. При $T_{\text{В}}$ равном сумме времени проведения работ по восстановлению $T_{\text{В раб}}$ и времени доставки блока из пункта хранения ЗИП-Г $T_{\text{В дост}}$ выражение для расчета $K_{\text{ОГ } L2}$ будет иметь вид:

$$K_{\text{ОГ } L_2} = \Omega_{L_2} = \frac{\dfrac{1}{\lambda_{L_2}} P}{\dfrac{1}{\lambda_{L_2}} P + T_{\text{ТО}}\left(R_{\text{ЗИП}}\right) + P(T_{\text{В раб}} + T_{\text{В дост}})} \ , \tag{4}$$

где λ_{L2} – интенсивности отказов блока L_2.

С учетом того, что блок L_2 может выйти из строя в любом РТС из состава распределенной группировки, а это событие носит случайный характер, вероятность восстановления в выражении (4) примет вид:

$$K_{\text{ОГ } L_2} = \Omega_{L_2} = \frac{\dfrac{1}{\lambda_{L_2}} P}{\dfrac{1}{\lambda_{L_2}} P + T_{\text{ТО}}\left(R_{\text{ЗИП}}\right) + \left(1 - P_{\text{тр}}\right) P(T_{\text{В раб}} + T_{\text{В дост}})} \ ,$$

где $P_{\text{тр}}$ – вероятность выхода из строя блока L_2 2 и более РТС в составе распределенной группировки.

Заключение. Для выбранного класса РТС, являющихся сложными техническими системами, были сформирован перечень допущений на их эксплуатационные характеристики. Составлена схема надежности типового РТС. Проведен анализ особенностей существующего научно-методического задела в области оценивания коэффициента оперативной готовности сложной технической системы. Предложен способ расчета вышеуказанного коэффициента для РТС в составе распределенной группировки и разработана соответствующая модель. При помощи указанной модели возможно проведение исследований по оцениванию влияния на коэффициент оперативной готовности РТС в составе распределённых группировок таких факторов, как состав и количество элементов группового ЗИП и время на его доставку, в том числе, с учетом стоимости необходимых для этого работ.

Список литературы

1. Урванцев И.А., Мурашкина Т.И. Экспериментальные исследования квантово-оптических систем // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». №2, 2012. С. 22 – 23.

2. Краковский Ю.М., З.Д. Нго Численные модели оценки коэффициента оперативной готовности и параметра потока восстановления многокомпонентного оборудования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 1 (49), 2016. С. 131 – 136.

3. Акимова Г.П., Соловьев А.В. Методология оценки надежности иерархических информационных систем // Труды ИСА РАН. Т. 26, 2006. С. 18 – 47.

4. Нетес В.А., Филин Б.П. Расчет коэффициента оперативной готовности систем с сетевой структурой // Автоматика и телемеханика. Вып. 9, 1992. С. 179 – 186.

5. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.

6. ГОСТ 27.003 – 2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.

7. ГОСТ Р 27.010 – 2019. Надежность в технике. Математические выражения для показателей безотказности, готовности, ремонтопригодности.

8. Утенков Ю.О. Анализ моделей процесса эксплуатации, обеспечивающих расчет показателей надежности РЭС вооружения войсковой ПВО, как функций обеспеченности запасными элементами // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. Т. 8. Вып. 3. 2009. [Электронный ресурс] URL: http://sgma.alpha-design.ru/MMORH/N-23-html/utenkov-2/utenkov-2.html (дата обращения: 10.03.2022 г.)

Закутаев Александр Александрович, начальник 562 лаборатории военного института (научно-исследовательского), zakutaev.a@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Емельянов Александр Владимирович, канд. техн. наук, начальник 561 лаборатории военного института (научно-исследовательского), slash1@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Качалин Александр Алексеевич, магистр, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Барякшев Сергей Валерьевич, адъюнкт, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

STUDY OF APPROACHES TO ASSESSING THE COEFFICIENT OF OPERATIONAL READINESS OF A RADIO ENGINEERING FACILITY AS PART OF A DISTRIBUTED CONSTELLATION

A.A. Zakutaev, A.V. Emelyanov, A.A. Kachalin, S.V. Bariakshev

For a complex radio equipment with accepted operational characteristics, a reliability scheme has been developed. The analysis of the features of the existing scientific and methodological apparatus for evaluating the coefficient of operational readiness of a radio technical facility was carried out. A method for estimating the above coefficient for a radio equipment as part of a distributed group is proposed, taking into account the formation of group sets of spare parts.

Key words: radio equipment, reliability, operational readiness factor, group sets of spare parts.

Zakutaev Alexander Alexandrovich, head of laboratory of military institute (research), zakutaev.a@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military space academy of Mozhaisky,

Emelyanov Alexander Vladimirovich, candidate of technical sciences, head of laboratory of military institute (research), slash1@inbox.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military space academy of Mozhaisky,

Kachalin Alexander Alekseevich, master, Russia, Saint-Petersburg, Military space academy of Mozhaisky,

Baryakshev Sergey Valerievich, adjunct, Russia, Saint-Petersburg, Military space academy of Mozhaisky

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-179-180

ОРГАНИЗАЦИЯ КОРПОРАТИВНОГО ХРАНИЛИЩА ДАННЫХ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ ПРОИЗВОДСТВА, ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕЦИКЛИНГА

И.Д. Сидельников

В статье исследуются основные аспекты проектирования корпоративного хранилища данных (КХД) для обменного фонда машиностроительных изделий, подлежащих возврату и восстановлению технического ресурса. Обоснована концептуальная схема КХД, отражающая замкнутый контур процессов производства, эксплуатации и рециклинга. Делается вывод о перспективности создания платформы цифрового обменного фонда.

Ключевые слова: обменный фонд, рециклинг, корпоративное хранилище данных, восстановление ресурса, эксплуатация техники.

В современных условиях санкционного давления на российскую промышленность отечественное машиностроение оказалось наиболее пострадавшим, и вынуждено функционировать в условиях жестких ограничений. В первую очередь это коснулось поставок импортных сертифицированных комплектующих для производства и послепродажного технического обслуживания, и в краткосрочной перспективе полная замена технологического оборудования и комплектующих будет невозможна, несмотря на все мероприятия по созданию импорто независимого отечественного производства.

В этой связи на первый план сейчас вышли проблемы увеличения длительности жизненного цикла техники, продления срока службы, повышения эффективности и рациональности использования ресурсов при производстве и эксплуатации изделий. Одним из основных способов борьбы с санкционным давлением на российское машиностроение должно стать активное внедрение технологий рециклинга, позволяющих восстановить отработавшие назначенный ресурс машины, оборудование и их детали и повторно ввести их в производственно-эксплуатационные процессы как восстановленное изделие или как продукцию с новыми потребительскими свойствами (1).

Рециклинг также позволяет осуществить переход к модели экономики замкнутого цикла, когда производство рассматривается как система по обработке прямых и возвратных потоков сырья и материалов, организованная в соответствии с принципами ресурсосбережения. Организация сбора и переработки продукции с выработанным техническим ресурсом осуществляется в замкнутом контуре «производство-эксплуатация-восстановление ресурса-повторное использование», где центральным элементом становятся компании, формирующие обменный фонд элементов (2). Основные принципы обработки возвратных потоков элементов с выработанным техническом ресурсом рассмотрены в (3).

В перспективе это позволило бы создать цифровую платформу, объединяющую процессы и участников жизненного цикла продукции, включая заказчиков и потребителей, предоставляющую полный комплект услуг от разработки техники на заказ до организованного сбора выработавших свой ресурс изделий и возврата их производителю для дальнейшей переработки и использования.

Постановка задачи. *Организация корпоративного хранилища данных для обменного фонда.*

Самым важным элементом создания такой платформы цифрового обменного пула является информационная система, организующая движение и обработку потоков данных между производителями, эксплуатантами техники и сервисными центрами и структурирующая данные в следующих разрезах:

– информация об объеме, номенклатурном составе деталей, времени поступления деталей в обменный фонд;

– информация об объеме и номенклатурном составе деталей, имеющихся в наличии в сервисных центрах;

– информация об объеме и номенклатурном составе деталей, имеющихся в запасе у эксплуатантов техники;

– вид, частота и причины возникновения отказов (плановых и неплановых);

– частота обращений компаний-эксплутантов в обменный фонд;

– какой процент использованных деталей выводится из оборота обменного фонда, какую долю деталей удается восстановить;

– какой вид восстановительных работ и в каком объеме производится;

– база данных о необходимых для проведения ремонта и восстановления элементов производственных мощностей;

– номенклатурный состав и объем планов производства и закупки, комплектующих заводами-изготовителями.

По мере роста объема и номенклатуры в системе обменного фонда встает вопрос о систематизации данных. Накопление информации сопровождается трудностями в сборе необходимых данных, их визуализации и анализе в том случае, если заранее не предусмотреть систематизированное и унифицированное складирование информации, подчиняющееся определенным правилам. Вопрос разрозненности и разобщенности значительных массивов данных возможно решить путем создания Корпоративного хранилища данных (КХД, DWH), и разработанные на его основе многомерные кубы данных, которые в нынешнее время активно используются различными компаниями (4, 5).

В хранилище данных вся информация систематизирована, каждый его элемент отвечает за определенную область деятельности компании или характерную ей часть. На основе информации Корпоративного хранилища данных возможно создавать витрины данных и строить аналитические отчеты, что в конечном счете позволяет не только собирать информацию в одном месте и определенными утвержденным образом, но и принимать на ее основе управленческие решения, отслеживать изменения системы, строить прогнозы и находить слабые места.

Хранилище данных — это предметно-ориентированное, привязанное ко времени и неизменяемое собрание данных для поддержки процесса принятия управляющих решений. Данные в хранилище попадают из оперативных систем (OLTP-систем), предназначенных для автоматизации бизнес-процессов, а также из внешних источников.

При поступлении данных из систем-источников данные сохраняются на первом слое хранилища в том виде, в котором они были на источнике. Этот слой называется слоем сырых данных, так как информация не проходит обработку и записывается в таблицы в первоначальном виде.

Далее данные претерпевают нормализацию, систематизацию и в ходе ETL-процесса записываются на детальный слой данных. Там информация хранится в более структурированном виде: появляются организованные по группам (например, бизнес-областям) таблицы, устанавливаются связи между этими таблицами для четкого понимания, что является источником для той или иной таблицы. Появляется логика организации КХД.

ETL (Extract, Transform, Load) — это трёхэтапный процесс управления данными, имеющий перевод на русский язык «извлечение, преобразование, загрузка». Сначала извлекается информация из структурированных и неструктурированных источников, затем преобразовывается в нужный формат и загружается в место назначения (6).

После наличия структурированной информации представляется возможным создание витрин данных, содержащих необходимую конечным пользователям информацию (7). В витрины могут попадать данные о бизнес-областях компании, каких-то выборочных ее участках или информация, полученная из различных источников детализированного слоя данных хранилища.

Общий вид Корпоративного хранилища данных представлен на рисунке (рис.1).

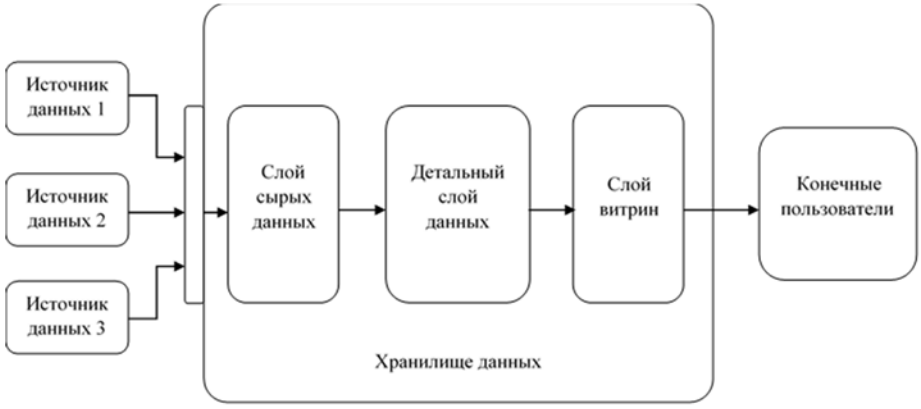


Рис. 1. Базовая схема корпоративного хранилища данных

Полученная в хранилище данных структуризация для наиболее эффективной работы с информацией (проверки гипотез, просмотра конкретных аспектов деятельности организации) должна быть подкреплена визуализацией. Благодаря возможности оперативного просмотра различных комбинаций данных ускоряется процесс принятия управленческих решений, а также появляются новые способы использования накопленных данных, что в конечном итоге приводит к повышению эффективности деятельности компании (8).

Инструментом, помогающим реализовать обозначенные выше требования, является технология оперативной аналитической обработки данных (On-line Analytical Processing, OLAP (9-11). Она широко используется для информационно-аналитической поддержки управления во многих сферах человеческой деятельности. Технология OLAP представляет современный метод анализа данных, который обеспечивает пользователя естественной, интуитивно понятной моделью данных, организуя их в виде многомерных кубов - OLAP-кубов (12-15).

Визуализировать многомерные кубы данных становится возможным благодаря использованию BI-систем (Business Intelligence) благодаря возможности их интеграции с хранилищами данных и разработанных в них витрин (16-18).

Но при создании цифровой платформы обменного пула надо иметь ввиду, что есть отличительная особенность, которую надо учитывать при проектировании КХД – источники данных являются также и потребителями данных. Другими словами, все участники такой платформы должны предоставлять качественную и правдивую информацию, так как в результате они же являются и ее конечными пользователями.

Для любого другого бизнеса, связанного с процессами производства, закупки и поставки, не характерно такое четкое замыкание информационных потоков – конечные пользователи данных не готовы делиться информацией с источниками данных, в роли которых выступают непосредственно покупатели/заказчики продукции.

Действительно, сложно представить ситуацию, когда производитель будет предоставлять право свободного доступа к данным о продукции своим конечным покупателям. Но при организации замкнутого контура производственно-эксплуатационных процессов, в рамках которого осуществляется рециклинг элементов, необходимо интегрировать компании, осуществляющие разработку, производство, поставку и послепродажное обслуживание, в единую информационную систему (рис. 2).

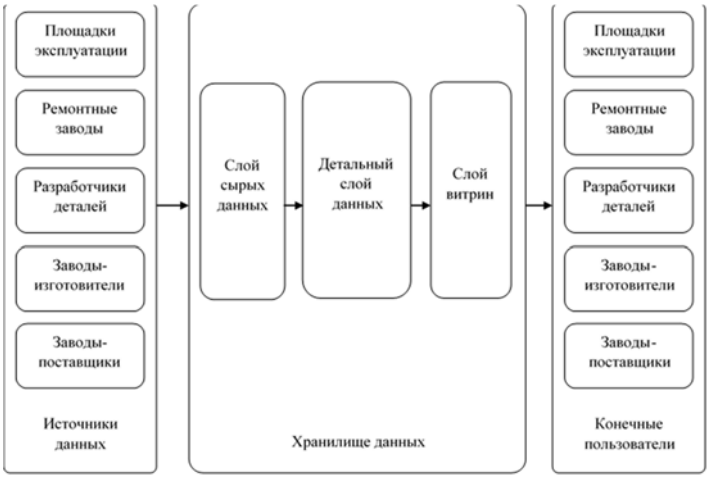


Рис. 2. Концептуальная схема корпоративного хранилища данных, отражающая замкнутый контур производства, эксплуатации и рециклинга

Заключение. Архитектура КХД цифрового обменного фонда должна отражать движение информационных потоков в замкнутом контуре прямых и возвратных потоков. Конечными продуктами такой платформы будут базы данных, аналитические отчеты, цифровые двойники процессов производства, ремонта и восстановления, вплоть до создания цифрового двойника жизненного цикла элемента (узла, агрегата). Такой цифровой двойник будет представлять собой компьютерную модель, включающую не только все параметры изделия, но также всю производственную и эксплуатационно-техническую информацию, руководство по ремонту и восстановлению, данные мониторинга поведения изделия в условиях реальной эксплуатации, информацию о всех видах и причинах отказов, данные о компаниях-эксплуатантах. Это позволит соединить разные данные из разных информационных систем, а регулярный анализ таких данных в КХД обменного фонда позволит выбирать наиболее эффективные технологии восстановления и оценивать эффективность рециклинга для больших парков техники в целом.

Список литературы

1. Бром А.Е., Котова П.К. Применение ресурсосберегающих технологий в деятельности предприятий машиностроительного комплекса // Устойчивое развитие и новая индустриализация: наука, экономика, образование. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. С. 54-58.

2. Сидельников И.Д., Бром А.Е. К вопросу планирования материального снабжения в машиностроении с учетом рециклинга // В сборнике: Машиностроение: инновационные аспекты развития. Материалы III международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 134-137.

3. Сидельников И.Д. Организация и обработка возвратных потоков на предприятии машиностроения // Наука и бизнес: пути развития. 2019. №12(102). С. 95-99.

4. Кокоулин А.Н., Южанинов Р.И. Многомерный анализ данных по обращаемости в лечебные учреждения с помощью средств Oracle Olap // Вестник ПНПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2015. № 13. С. 5-14.

5. Коробко А.В., Пенькова Т.Г. Представление и применение знаний о кубах -концептах для поддержки адаптации манипулирования объектами анализа OLAP// Вестник СибГАУ. № 30 (49). 2013. С. 51-57.
6. Исаев Д.В., Кравченко Т.К. Информационные технологии управленческого учета. Учебно-методический комплекс (УМК). М., ГУ-ВШЭ, 2006. 297 с.
7. Терещенко О.В., Курилович Н.В., Князева Е.И. Многомерный статистический анализ данных в социальных науках : учеб. пособие. Минск: БГУ, 2012. 239 с.
8. Паклин Н., Орешков В. Бизнес аналитика. От данных к знаниям [Текст] / Н. Палкин, В. Орешков. М.: Питер, 2013. 704 с.
9. Барсегян А.А. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / А.А. Барсегян [и др.]. СПб.: БХВ-Петербург, 2004.
10. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. 8-е изд. М.: «Вильямс», 2016. 1328 с.
11. Abello A., Romero O. On-line analytical processing. Encyclopedia of Database Systems: Springer US. 2009. P. 1949-1954.
12. Codd E.F., Codd S.B., Salley C.T. Providing OLAP to User-Analysts: An IT Mandate, E.F. Codd & Associates. 1993. 24 p.
13. Метус А.М. Формальное описание расчета многомерных аналитических показателей в виде последовательности операций над OLAP-кубом // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. №2 (14). С. 209-215.
14. Демченко А.А. Использование OLAP-технологий при обработке данных // Решетневские чтения. Информационно-управляющие системы. 2014. С. 185-186.
15. Демченко А.А., Молоков В.В. OLAP-технология анализа данных // Секция «Информационно-управляющие системы». 2014. № 2/2. С. 332-333.
16. Митрович С. Специфика интеграции технологий бизнес-интеллекта и больших данных в процессы экономического анализа // Бизнес-информатика. 2017. № 4 (42). С. 40-46.
17. Михненко О.Е. Цифровая трансформация аналитических процессов бизнеса // Учет. Анализ. Аудит. 2021. Т. 8, № 2. С. 62-70.
18. Новотна И.А. BI-системы: анализ понятия и функциональных возможностей / И.А. Новотна, И.В. Иванчук - Теория и практика общественного развития. 2023. №2. С. 92-94.

Сидельников Иван Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент, bauman@bmstu.ru, Россия, Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ORGANIZATION OF A CORPORATE DATA WAREHOUSE IN A CLOSED LOOP OF PRODUCTION, OPERATION AND RECYCLING

I.D. Sidelnikov

The article examines the main aspects of designing a corporate data warehouse (CDW) for the exchange fund of engineering products subject to return and restoration of a technical resource. A conceptual scheme of QCD is substantiated, which reflects a closed loop of production, operation, and recycling processes. It is concluded that the creation of a digital exchange fund platform is promising.
Key words: exchange fund, recycling, corporate data storage, resource recovery, equipment operation.

Sidelnikov Ivan Dmitrievich, candidate of technical sciences, docent, bauman@bmstu.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University

УДК 519.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-182-183

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОГО СЕЧЕНИЯ

А.А. Сназин, В.И. Шевченко

Рассматриваются результаты численного моделирования распространения детонационных волн в плоских кольцевых каналах различного сечения в кислородно-водородной смеси газов. Моделирование проводится в нестационарной постановке на основе уравнений Навье-Стокса, замыкающихся моделью турбулентности k-ω SST. Химические превращения многокомпонентной смеси газов происходит на основе подробной модели химической кинетики, состоящей из 9 элементов и 19 обратимых реакций. Показано влияние ширины канала на скорость распространения детонационных волн вдоль внешней и внутренней стенки. Определены основные факторы, влияющие на стабильное распространение детонационной волны.
Ключевые слова: численное моделирование, детонация, дифракция, смесь газов.

Введение. Для исследования влияния геометрии канала на распространение детонационной волны в окружном направлении можно упростить до распространения детонационной волны в кольцевом канале через неподвижную газовую смесь. В результате сложного взаимодействия детонационной волны со стенками кольцевого канала могут появляться специфические режимы распространения, в том числе нестабильное распространение с появлением отказа детонации или повторным инициированием [1 - 4]. В работах [5,6] показано, что может происходить повторное инициирование детонации в результате воспламенения несгоревшей смеси в отсоединенной области.

В работе [7] показано, что формирование повторного инициирования может определяться геометрией канала и начальным давлением. Эти исследования дают представление о сложной динамике распространения детонационных волн в кольцевых каналах и различных факторах, которые могут влиять на их устойчивость.

Целью данной работы является изучение распространения детонационной волны в кольцевом канале в двухмерной постановке. Обсуждается влияние различных составов смесей на возникновение вращающейся детонационной волны.

2. **Постановка задачи.** Моделирование распространения детонационной волны в кольцевых каналах проводилось в двумерной постановке, как показано на рисунке 1. Объект исследование представляет собой канал радиусом R = 18 мм, шириной заданной отношением R/d = 3.6, 2.6, 2.0 и прямым участком l = 20 мм.

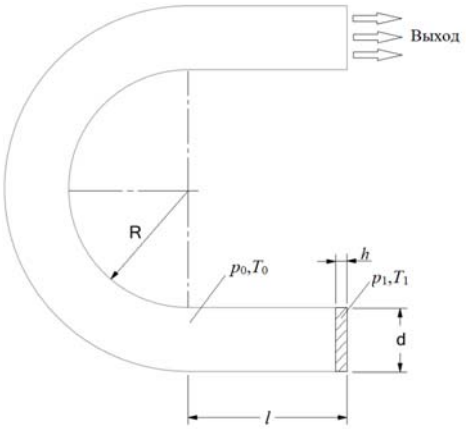


Рис. 1. Геометрия плоского канала

На внешнюю и внутреннюю стенки канала наложены условия прилипания. Расчеты проводились на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замыкающихся моделью турбулентности k-ω SST [8]. Одним из главных преимуществ данной модели является возможность интегрирования без дополнительных членов через вязкий подслой, что снижает чувствительность метода к величине y^+. Поэтому для экономии вычислительных мощностей высота первой ячейки пристеночного слоя задана равной 0,01 мм. В данном случае течение в пограничном слое не может быть смоделированной детально, но это не будет оказывать существенного влияния на общее течение.

Для решения уравнений течения и турбулентности используется противопоточная схема второго порядка, а в качестве метода временного шага применяется неявная схема второго порядка [9].

Процесс детонационного горения моделируется с помощью модели химической кинетики водорода и кислорода. Модель состоит из 9 элементов (H_2, O_2, O, H, OH, HO_2, H_2O_2, H_2O, Ar) и 19 обратимых реакций, разработанные Вилсоном и МакКорнаком [10]. В модели присутствуют два типа элементарных реакций: реакции обмена, такие как A+B↔C+D и реакции рекомбинации: A+B+M↔C+M. Все реакции обратимы, поэтому реакции рекомбинации можно записать наоборот, т.е. как реакцию диссоциации. Символ M в формуле означает влияние компонентов, не изменяющихся в ходе реакции. В используемой модели химической кинетики в качестве такого компонента был применен газ аргон, являющийся нейтральным газом. Расчетная область инициализируется заполненной газовой смесью с мольными долями $X_{H_2} = 0.2$, $X_{O_2} = 0.1$, $X_{Ar} = 0.7$, с температурой T_0 = 298K и давлением p_0 = 0.1 МПа. На входе задается небольшая область (h = 2мм) повышенного давления p_1 = 0.12 МПа и температурой T_1 = 2000 K. На выходе из канала задается давление равное атмосферному p_0 = 0.1 МПа. Исследование процессов инициирования и распространения детонационных волн в каналах различных устройств сопровождается необходимостью разрешения газодинамических неоднородностей больших градиентов. Для разрешения газодинамических неоднородностей, с учетом вычислительных затрат, сетка конечных элементов расчетной области состоит из 2.253×10^6 элементов.

3. **Результаты моделирования.** На рисунке 2 приведена последовательность с численных шлирен картин для соответствующих режимов моделирования. Временной интервал между каждыми двумя волновыми фронтами в наложении эквивалентен.

В процессе моделирования в правой части канала задается локальная область с высоким давлением (рисунок 1.), в результате чего образуются сильные ударные волны. Затем эти ударные волны распространяются и взаимодействуют с другими (ослабленными) ударными волнами и твердыми стенками, образуя детонационные волны. Детонационные волны распространяются и развиваются в поперечную и падающую волну, при этом они обе движутся с околозвуковой скоростью. Вначале образуется много поперечных волн, как показано на рисунок. 2, однако затем количество поперечных волн уменьшается из-за взаимодействия между поперечными волнами и твердыми стенками (рисунок 2). Видно, что стабильность распространения детонационной волны зависит в основном от процесса дифракции на внутренней стенке, в то время как влияние эффекта отражения вблизи внешней стенки полностью игнорируется.

На рисунке 3 показана численная шлирен картина распространения детонационной волны с обозначением центральных углов θ на которых расположен фронт ударной волны. Из рисунка видно, что фронт детонационной волны отделяется за счет дифракционного эффекта вблизи внутренней стенки. Поскольку сжатие внешней стенки приводит к возникновению зоны высоких температур и давлений за тройной точкой, газ, предварительно перемешанный в области расщепления, может быстро воспламениться, образуя локальную детонацию, распространяющуюся в поперечном направлении вместе с тройной точкой отражения [11-13].

На рисунке 4 представлены изменения скорости фронта детонационной волны на внутренней и внешней стенках в зависимости от центрального угла θ. Скорость представлена безразмерной величиной путем деления скорости фронта V на величину V_{CJ} (скорость детонации Чепмена-Жуге).

Видно, что вследствии дифракции детонации и отрыва волнового фронта от внутренней стенки, скорость V у внутренней стенки значительно меньше V_{CJ} в большинстве положений и имеет тенденцию к уменьшению вместе с θ. Однако наблюдается значительный рост, когда тройная точка отражения Маха движется к внутренней стенке, и скорость достигает максимума в месте столкновения тройной точки со стенкой. Взаимодействие с этой тройной точкой приводит к перегруппировке дифрагированного волнового фронта и усиливает детонацию. Более того, весь фронт детонационной волны соединяется, когда тройная точка достигает стенки, что соответствует наибольшей скорости. В отличие от этого, эволюция скорости на внешней стенке относительно стабильна и в целом $V/V_{CJ} > 1$, что свидетельствует о том, что детонационная волна находится в состоянии перегрузки. Увеличение ширины канала приводит к тому, что процесс дифракции приводит к снижению скорости на внутренней стенке канала. Среднее значение отношения скоростей распространения детонационной волны при R/d = 2.6 по внутренней стенке равно $V_{вн}/V_{CJ} = 0,82$, а по внешней – $V_{нар}/V_{CJ} = 1,08$. При $R/d = 2$ отношение скоростей по внутренней стенке достигает значений $V_{вн}/V_{CJ} = 0,84$, по внешней - $V_{нар}/V_{CJ} = 1,16$. Такая большая разница скоростях по внешней и внутренней стенкам канала скорее всего вызвана регулярным переотражением, что делает угол фронта волны намного меньше у внешней стенки.

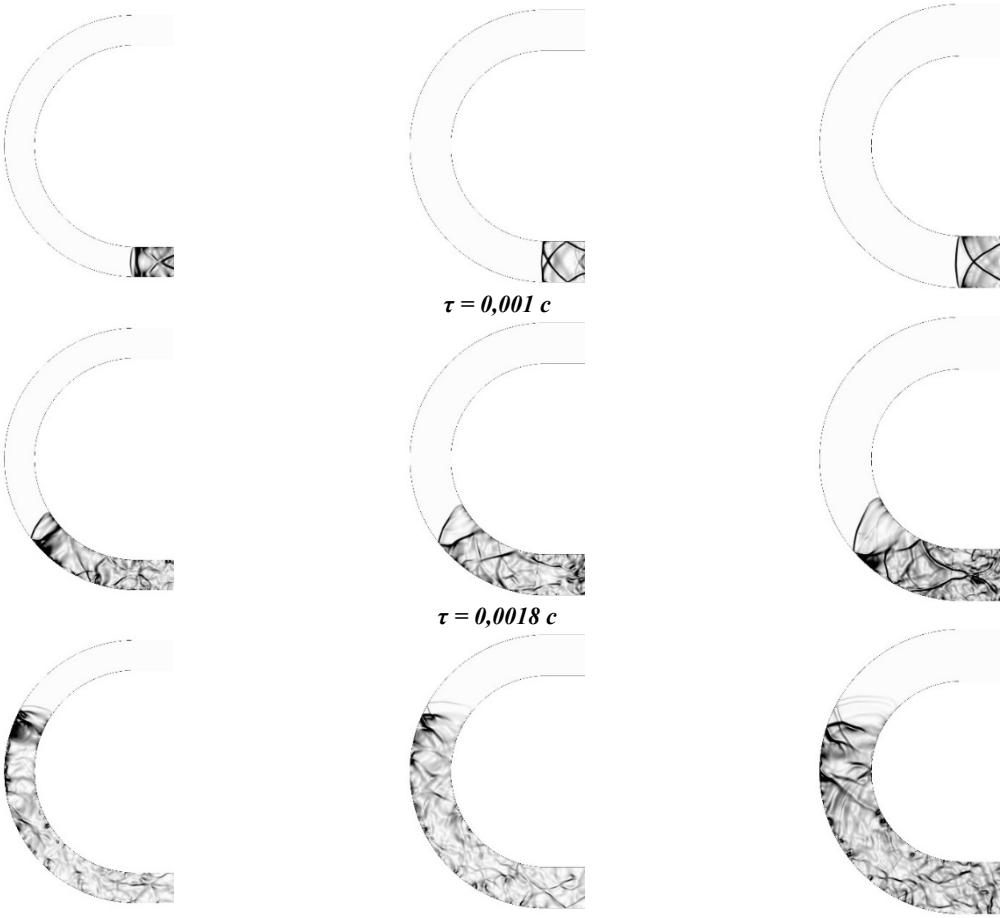


Рис. 2. Эволюция детонационных волн при распространении по кольцевым каналам различной ширины

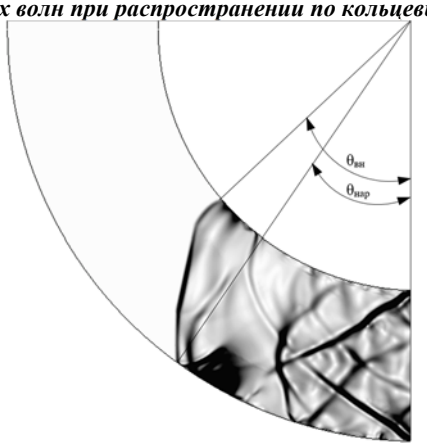
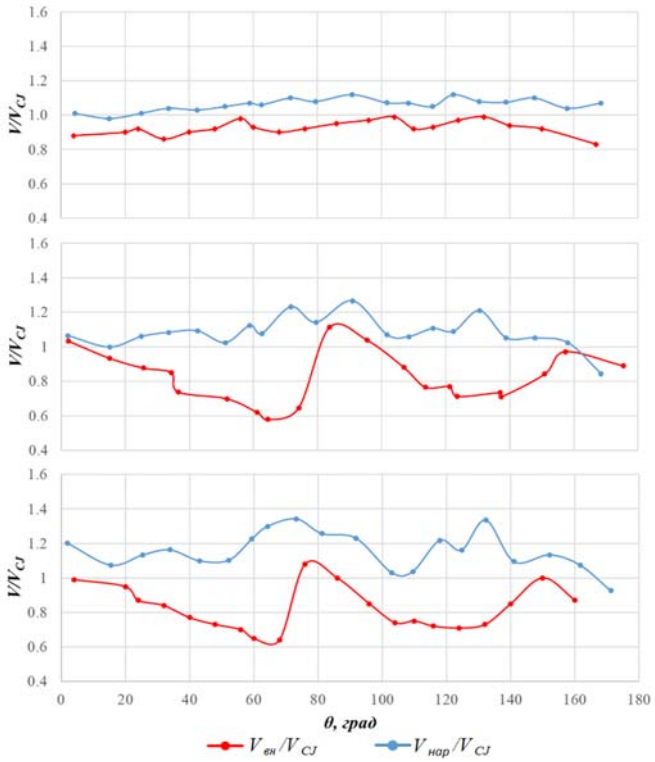


Рис. 3. Численные шлирен картины распространения детонационной волны с обозначением центральных углов θ

Уменьшение радиального расстояния между внутренней и внешней стенками канала сокращает путь дифрагированной ударной волны, что позволяет стабильно распространяться по длине канала. Из рисунков 2 и 4 видно, что фронт детонационной волны в канале R/d = 3.6 распространяется, фактически, со звуковой скоростью, имеет почти плоскую форму и перпендикулярен внутренней и внешним стенкам. На рисунке (рисунок 4) показано изменение скорости фронта волны вблизи внутренней и внешней стенок канала. Видно, что скорость меняется плавно и остается постоянной. Практически перпендикулярное положение детонационной волны к внешней и внутренней стенкам делает отношения $V_{вн}/V_{CJ}$ и $V_{нар}/V_{CJ}$ практически близкими к единице. Среднее значение отношения скоростей на внешней стенке равно $V_{нар}/V_{CJ}$ = 1,06, а на внутренней $V_{вн}/V_{CJ}$ = 0,93.



R/d = 3.6

R/d = 2.6

R/d = 2

Рис. 4. График изменения скорости распространения детонационной волны вдоль внутренней и внешней стенок канала

Выводы. Динамика распространения детонационной волны в кольцевых каналах была исследована с помощью двумерного численного моделирования с применением подробной модели химической кинетики реакции кислорода с водородом. Подробно рассмотрены режимы распространения детонационной волны, механизмы формирования, структура и скорость на обоих стенках для всех вариантов исследования. Исследованы три конфигурации кольцевого канала: R/d = 3.6, 2.6, 2.0. Для всех вариантов получен устойчивый режим распространения волны.

Для кольцевого канала наименьшей ширины (R/d = 3.6) получено, что фронт имеет практически прямой профиль, при этом скорость по внешней и внутренней стенкам канала различаются менее чем на 15% процентов и имеют плавных характер изменения. С увеличением радиального расстояния между внутренней и внешней стенками канала происходит резкое изменение в соотношении скоростей по внутренней и внешней стенке канала. Разница между средним значением отношения скоростей распространения детонационной волны при R/d = 2.6 по внутренней и внешней стенке достигает 24%, при R/d = 2.0 эта разница составляет 28%.

Полученные результаты дают широкое представление о сложном поведении ударных волн при прохождении кольцевых каналов, что позволит в дальнейшем использовать их при проектировании перспективных детонационных двигателей.

Список литературы

1. Deiterding R. A parallel adaptive method for simulating shock-induced combustion with detailed chemical kinetics in complex domains // Comput. Struct. 87, 769 (2009).

2. Deiterding R., High-resolution numerical simulation and analysis of Mach reflection structures in detonation waves in low-pressure H2–O2–Ar mixtures: A summary of results obtained with the adaptive mesh refinement framework AMROC. J. Combust. 2011, 738969.

3. Сназин А.А. Исследование влияния импульсной детонации газа в канале сложной формы на дифракцию ударных волн / А.А. Сназин, В.И. Шевченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 4. С. 251-255. DOI 10.24412/2071-6168-2023-4-251-256. EDN VRNPUY.

4. Сназин А.А. Исследование влияния геометрии канала на дифракцию ударных волн при детонации газа / А. А. Сназин, В. И. Шевченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 2. С. 163-168. DOI 10.24412/2071-6168-2023-2-163-168. EDN BPGBAR.

5. Гидаспов В.Ю., Москаленко О.А. Численное моделирование инициирование детонации в керосиновоздушной газокапельной смеси падающей ударной волной // Труды МАИ. 2016. №90.

6. Фролов В.Н. Экспериментальные исследования инициирования детонации и режимов работы камеры пульсирующего детонационного двигателя. / В.Н. Фролов, И.В. Гаранин // Труды МАИ. 2010. №038. С.13. EDN MQPNWB.

7. Li J., Ren, H. Ning J. Numerical application of additive Runge-Kutta methods on detonation interaction with pipe bends // Int. J. Hydrogen Energy 38, 9016 (2013).

8. Yuan X., Zhou J., Lin Z., Cai X. Adaptive simulations of detonation propagation in 90-degree bent tubes // Int. J. Hydrogen Energy 41, 18259 (2016).

9. Melguizo-Gavilanes J., Rodriguez V., Vidal P., Zitoun R. Dynamics of detonation transmission and propagation in a curved chamber: A numerical and experimental analysis // Combust. Flame 223, 460 (2021).

10. Menter FR. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA J 1994;32(8):1598e605.

11. Исследование локальной адаптации сетки конечных элементов в задаче обтекания тела сверхзвуковым потоком / А.А. Сназин, А.В. Шевченко, Е.Б. Панфилов // Труды МАИ. 2022. №125. DOI 10.34759/trd-2022-125-06. EDN DJAQVA.

12. Wilson G.J., MacCormack R.W. Modelling supersonic combustion using a full-implicit numerical method. AIAA 90-2307,1990.

13. Li J., Ren H., Ning J. Numerical application of additive Runge-Kutta methods on detonation interaction with pipe bends, Int. J. Hydrogen Energy 38, 9016 (2013).

14. Yuan X., Zhou J., Lin Z., Cai X. Adaptive simulations of detonation propagation in 90-degree bent tubes, Int. J. Hydrogen Energy 41, 18259 (2016).

15. Yuan X.Q., Mi X.C., Ng H.D., Zhou J. A model for the trajectory of the transverse detonation resulting from re-initiation of a diffracted detonation, Shock Waves 30, 13 (2020).

Сназин Александр Андреевич, канд. техн. наук., старший научный сотрудник, alexsnzn@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,

Шевченко Василий Иванович, младший научный сотрудник, artnetru@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

NUMERICAL SIMULATION OF SHOCK WAVE PROPAGATION IN VARIOUS CROSS-SECTIONS ANNULAR CHANNELS

A.A. Snazin, V.I. Shevchenko

The numerical simulation results of the detonation waves propagation in various cross-sections flat annular channels in an oxygen-hydrogen gases mixture are considered. The simulation is carried out in a non-stationary formulation based on the Navier-Stokes equations, with the SST turbulence model. Chemical transformations of a multicomponent gas mixture based on a detailed chemical kinetics model consisting of 9 elements and 19 reversible reactions. The channel width influence to the detonation waves propagation velocity along the outer and inner walls is shown. The main factors influencing the stable detonation wave propagation are determined.

Key words: numerical simulation, detonation, diffraction, gas mixture.

Snazin Aleksandr Andreevich, candidate of technical science, senior researcher, alexsnzn@gmail.com, Russia, Saint-Peterburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Shevchenko Vasiliy Ivanovich, junior researcher, artnetru@yandex.ru, Russia, Saint-Peterburg, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 535.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-186-187

РАСЧЕТ ХРОМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ МЕТОДОМ ФОН КРИСА

В.Л. Жбанова, В.Р. Гафуров

В работе исследована монохроматическая адаптация по модели фон Криса. Представлен расчет и анализ результатов исследования. Для контрольных расчетов выбраны стандартные 14 цветов из атласа Манселла, принятые Международной комиссией по освещению при оценке цветопередачи источников излучения. Произведен расчет этих цветов относительно стандартных источников типа A, B, C, D65. Также найдены координаты цвета выбранных образцов матричными преобразованиями по фон Крису от источника типа A к источникам типа B, C, D65. В равноконтрастной системе CIELAB определены цветовые различия между координатами цветов рассчитанных интегрально и через матрицы по фон Крису методом CIE 1994. В результате исследований выявлено: модель преобразования фон Криса подходит для работы с малонасыщенными цветами, близкими к источнику опорного белого света. Но приводит к видимым изменениям цветности при преобразовании насыщенных цветов. Поэтому при проведении научных исследований, где важно точное определение цвета или цветности объекта, лучше получать точные координаты цвета экспериментально или через интегральные преобразования спектральных характеристик исследуемых объектов, а не пользоваться хроматической адаптацией.

Ключевые слова: цвет, цветность, матрица преобразования, хроматические преобразования, фон Крис.

Зрительная система человека имеет особенность динамически адаптироваться и оптимизировать зрительную реакцию к изменению определенных условий просмотра. Фактически, эта система способна автоматически выполнять хроматическую адаптацию для сохранения постоянства цвета, т.е. независимо регулировать чувствительность трех ответов колбочек. Однако системы обработки изображений, такие как сканеры и цифровые камеры, не имеют возможности регулировать относительную реакцию своих сенсоров, как зрительная система. В этом случае необходимо преобразование хроматической адаптации [1, 2].

Адаптацию можно рассматривать как динамический механизм зрительной системы человека при оптимизации зрительной реакции на определенные условия просмотра. Вычислительная цветовая адаптация относится к использованию алгоритмов для предсказания реального цвета объекта, когда тот виден и запечатлен под различными источниками света. Это базовая операция в модели цветового облика, где целью является предоставление полной и достоверной цветовой информации, отвечающей требованиям реальных приложений, включая баланс белого и распознавание кожи по цвету. Но при условии, что источники света известны, детерминированное предсказание возможно, если модель формирования изображения позволяет записать выходное изображение как функцию входного изображения [3-5].

В литературе описано несколько преобразований хроматической адаптации, большинство из которых основано на модели фон Криса. Модель хроматической адаптации, предложенная фон Крисом, является одной из наиболее распространенных моделей в области цветового зрения. Она обеспечивает математическое описание того, как зрительная система приспосабливается к различным условиям освещения, и используется для объяснения широкого спектра явлений хроматической адаптации. Эта модель утверждает, что трихроматические отклики соответствующих измерений поверхности при двух источниках света представляют собой простое масштабирование друг от друга.

Цель работы – исследовать хроматическую адаптацию методом фон Крис по величине цветового различия. Методика исследований основана на рекомендациях МКО (Международной комиссии по освещению).

Модель преобразования фон Криса. Модель хроматической адаптации фон Криса представляет собой математическое описание того, как зрительная система человека приспосабливается к изменениям условий освещения. Впервые модель предложена немецким психологом Максом Фон Крисом в начале XX века и остается одной из наиболее широко распространенных моделей в области цветового зрения.

Модель основана на идее, что зрительная система регулирует чувствительность колбочек сетчатки к изменениям спектрального состава источника света. Это позволяет зрительной системе сохранять воспринимаемое цветовое постоянство объектов даже при различных условиях освещения. Таким образом, модель фон Криса основана на математическом преобразовании, которое применяется к откликам колбочек в сетчатке. Коэффициенты этого преобразования рассчитываются на основе сравнения спектральных мощностей эталонного и адаптирующегося источников света. После преобразования отклики колбочек используются для определения хроматических стимулов, влияющих на восприятие цвета объекта.

Разница между различными алгоритмами хроматической адаптации состоит в выборе эталонных цветов и определении матрицы пересчета. Первым определил ее как раз фон Крис. Разные исследователи предлагали методы пересчета цветовых координат от одного источника к эталону, а затем от него к другому источнику [4]:

$$\begin{bmatrix} X_D & Y_D & Z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S & Y_S & Z_S \end{bmatrix} \times [M], \tag{1}$$

где X_S, Y_S, Z_S, X_D, Y_D, Z_D – координаты цвета, рассчитанные относительно первого и второго источника излучения; M – матрица пересчета координат цвета.

Также фон Крисом были выведены коэффициенты преобразования, основанные на спектральной чувствительности трех видов колбочек [4]:

$$[M] = [M_a] \times \begin{bmatrix} K_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & K_\beta & 0 \\ 0 & 0 & K_\gamma \end{bmatrix} \times [M_a]^{-1}, \tag{2}$$

где

$$\begin{gathered} K_\alpha = \alpha_D / \alpha_S,\ K_\beta = \beta_D / \beta_S,\ K_\gamma = \gamma_D / \gamma_S, \\ \begin{bmatrix} \alpha_S & \beta_S & \gamma_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{0S} & Y_{0S} & Z_{0S} \end{bmatrix} \times [M_a], \\ \begin{bmatrix} \alpha_D & \beta_D & \gamma_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{0D} & Y_{0D} & Z_{0D} \end{bmatrix} \times [M_a], \end{gathered} \tag{3}$$

и X_{0S}, Y_{0S}, Z_{0S}, X_{0D}, Y_{0D}, Z_{0D} – координаты цвета излучателя относительно которых рассчитаны значения и к которым осуществляется пересчет; M_a – матрица, которая определяет ответ колбочек на поток излучения трех эталонных цветов:

$$[M_a] = \begin{bmatrix} 0{,}4002400 & 0{,}7076000 & -0{,}0808100 \\ -0{,}2263000 & 1{,}1653200 & 0{,}0457000 \\ 0{,}0000000 & 0{,}0000000 & 0{,}9182200 \end{bmatrix} \quad [M_a]^{-1} = \begin{bmatrix} 1{,}8599364 & -1{,}1293816 & 0{,}2198974 \\ 0{,}3611914 & 0{,}6388125 & -0{,}0000064 \\ 0{,}0000000 & 0{,}0000000 & 1{,}0890636 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Чтобы пересчитать цветовые координаты источника света в цветовые координаты другого источника, необходимо иметь матрицу, которую можно вычислить, используя цветовые координаты исходного и желаемого источников. После вычисления последней, можно применять выражение (1) для дальнейшего пересчета.

Например, пересчитывая цветовые координаты от стандартного излучателя A к стандартным источникам МКО B, C и D65 [4]:

$$[M_{A\to B}] = \begin{bmatrix} 0{,}9574884 & -0{,}1643613 & 0{,}2902356 \\ -0{,}0180539 & 1{,}0185379 & 0{,}0036373 \\ 0{,}0000000 & 0{,}0000000 & 2{,}3949136 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$[M_{A\to C}] = \begin{bmatrix} 0{,}9418277 & -0{,}2249131 & 0{,}4806950 \\ -0{,}0247051 & 1{,}0253682 & 0{,}0049749 \\ 0{,}0000000 & 0{,}0000000 & 3{,}3225235 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\left[M_{A\to D_{65}}\right]=\begin{bmatrix} 0,9394987 & -0,2339150 & 0,4281177 \\ -0,0256939 & 1,0263828 & 0,0051761 \\ 0,0000000 & 0,0000000 & 3,0598005 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Вопреки эмпирической поддержке, модель фон Криса имеет ряд ограничений. Так, например, предполагается линейная связь между откликами колбочек и хроматическими стимулами, что не всегда является достоверным. Кроме того, модель базируется на математическом описании зрения среднего человека, и учет индивидуальных особенностей в хроматической адаптации может быть опущен.

Методика оценки и сравнения качества цветопередачи. Для оценки и сравнения качества цветопередачи после хроматического преобразования выбрана равноконтрастная система CIELAB, разработанная МКО, данная система служит в качестве единого цветового пространства для подбора цветов и расчетов цветовых различий. Система основана на восприятии цвета человеком и обеспечивает единообразное представление цветовых различий. Это делает ее отличным инструментом для оценки цветопередачи.

Чтобы определить цветовое различие в CIELAB, цвет сначала должен быть преобразован из XYZ в цветовое пространство CIELCH (модификация системы CIELAB в полярные координаты) [6]. Этот процесс преобразования учитывает спектральную чувствительность человеческого глаза и источника света. Полученные значения можно использовать для сравнения характеристик цветопередачи различных устройств и материалов.

В системе CIELCH используется три параметра для описания цвета: светлота (L^*), цветность (C^*) и оттенок (h). Значение L^* представляет собой светлоту или темноту цвета, C^* – цветность, насыщенность или интенсивность и яркость цвета, значение h – оттенок или тон цвета [6, 7].

Ниже приведены формулы для расчета CIELAB:

$$L^* = 116 f\left(Y/Y_n\right) - 16, \quad (8)$$

$$a^* = 500\left(f\left(X/X_n\right) - f\left(Y/Y_n\right)\right), \quad (9)$$

$$b^* = 200\left(f\left(Y/Y_n\right) - f\left(Z/Z_n\right)\right), \quad (10)$$

где

$$f(t)=\begin{cases} \sqrt[3]{t}, & \text{если } t > \varepsilon \\ t\cdot\dfrac{k+16}{116}, & \end{cases}. \quad (11)$$

Значения X_n, Y_n, Z_n – координаты белой точки; при фактическом стандарте МКО: □ = 0,008856, k = 903,3, $t = X/X_n$, Y/Y_n, Z/Z_n [4].

Наиболее распространенным методом оценки цветопередачи по системе CIELAB является расчет ΔE и представляет собой разницу между оригинальным и воспроизведенным цветами. Меньшее значение ΔE указывает на лучшую цветопередачу, поскольку это означает, что разница между оригинальным и воспроизведенным цветами меньше. Расчеты ΔE широко используются в полиграфии и цифровой дисплейной индустрии, что позволяет объективно сравнивать характеристики цветопередачи различных устройств и материалов.

В 1994 году была принята формула ΔE, которая учитывает не только разницу в координатах L^*, a^*, b^* в цветовом пространстве CIELAB, но и разность в координатах цветности H и насыщенности C в цветовом пространстве CIELCH. Параметр ΔE между цветом образца (L_2^*, a_2^*, b_2^*) и эталонным цветом (L_1^*, a_1^*, b_1^*) находится следующим образом:

$$\Delta E_{1994} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H}\right)^2}, \quad (12)$$

где $\Delta L = L_1^* - L_2^*$, $\Delta C = C_1^* - C_2^*$, $\Delta L = ((a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2 - \Delta C^2)^{1/2}$; $K_C = 1$, $K_H = 1$ – взвешивающие коэффициенты и обычно равные единице; $S_L = 1$, $S_C = 1 + K_1 (C_1^* + C_2^*/2)$, $S_H = 1 + K_2 (C_1^* + C_2^*/2)$; $K_1 = 0,045$, $K_2 = 0,015$, $K_L = 1$ – для графики и полиграфии; $K_1 = 0,048$, $K_2 = 0,014$, $K_L = 2$ – для текстильной промышленности.

Следует отметить, что система CIELAB является эффективным инструментом для оценки цветопередачи, поскольку она учитывает как числовые, так и перцептивные различия между цветами [8, 9].

Результаты. В качестве объекта исследования приняты координаты цвета 14 образцов из атласа Манселла, принятые МКО в качестве контрольных при измерении цветопередачи источников излучения [10, с. 417-418].

Параметры этих цветов при освещении источником А (2856 К) в системе XYZ МКО 1931 г. представлены в табл. 1 [10, с. 342].

Для нахождения изменения цветности при преобразованиях фон Криса необходимо определить теоретические («чистые») значения координат цвета при выбранных источниках излучения. Координаты цвета X, Y, Z, связаны относительной спектральной плотностью потока излучения источника света и кривыми сложения цветов следующими выражениями [8-10]:

$$X = \sum_{i=1}^{n} \bar{x}(\lambda)_i \Phi_e(\lambda)_i, \quad (13)$$

$$Y = \sum_{i=1}^{n} \bar{y}(\lambda)_i \Phi_e(\lambda)_i, \quad (14)$$

$$Z = \sum_{i=1}^{n} \bar{z}(\lambda)_i \Phi_e(\lambda)_i, \quad (15)$$

где $\Phi_e(\lambda)$ – плотность потока излучения источника света (из ГОСТ 7721-89), $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – кривые сложения цвета (из ГОСТ Р 55703-2013).

Таким образом, были определены теоретические координаты цветности для 14 цветов относительно источников B, C и D65, представленные в табл. 2.

Таблица 1

Наборы контрольных цветов по МКО при освещении источником А

МКО	Шифр атласа Манселла	Наименование цвета	Координаты цвета в системе МКО 1931 г.		
			X	Y	Z
1	7,5 R 6/4	Светлый серо-красный	40,21	33,03	8,32
2	5 Y 6/4	Серо-желтый	34,88	31,44	4,76
3	5 GY 6/8	Желто-зеленый	30,85	32,02	3,1
4	2,5 G 6/6	Светло-зеленый	24,03	26,49	6,16
5	10 BG 6/4	Светло-голубой	26,88	27,44	12,86
6	5 PB 6/8	Светло-синий	27,46	25,29	19,21
7	2,5 P 6/8	Светло-фиолетовый	34,36	28,22	18,67
8	10 P 6/8	Пурпурный	39,87	31,23	15,94
9	4,5 R 4/13	Красный	22,17	12,66	1,61
10	5 Y 8/10	Желтый	74,12	68,4	3,65
11	4,5 G 5/8	Зеленый	13,63	16,35	4,66
12	5 PB 3/11	Синий	3,38	3,14	7,63
13	5 YR 8/5	Розовый (цвет кожи)	74,71	64,22	13,9
14	5 GY 4/4	Зеленый (цвет листьев)	12,02	12,48	1,78

По выражению (1) были преобразованы координаты 14 цветов от источника типа А к источникам излучения типов B, C и D_{65} по матрицам пересчета (5-7). Далее рассчитанные координаты цвета в системах XYZ МКО 1931 г. переводятся в систему CIELAB по выражениям (8-11), после чего определяется цветовое различие ΔE по выражению (12).

Результаты хроматического преобразования по модели фон Криса представлены в табл. 2.

Для представления цветовых преобразований в различных системах были построены координаты цветности 14 цветов в CIEXYZ и CIELAB (рис. 1). Более наглядно цветовое различие прослеживается в системе CIEXYZ, поэтому для источников типа C и D65 координаты цветов представлены на графике xy (рис. 2).

Если качественно оценить полученные результаты по рис. 1 и рис. 2, то становится очевидно: координаты цветов теории и практики расположены относительно друг друга равномерно, но на некотором интервале (цветовом различии), это указывает на недостаточную точность хроматического преобразования по модели фон Криса. Так как в идеале они должны соответствовать друг другу.

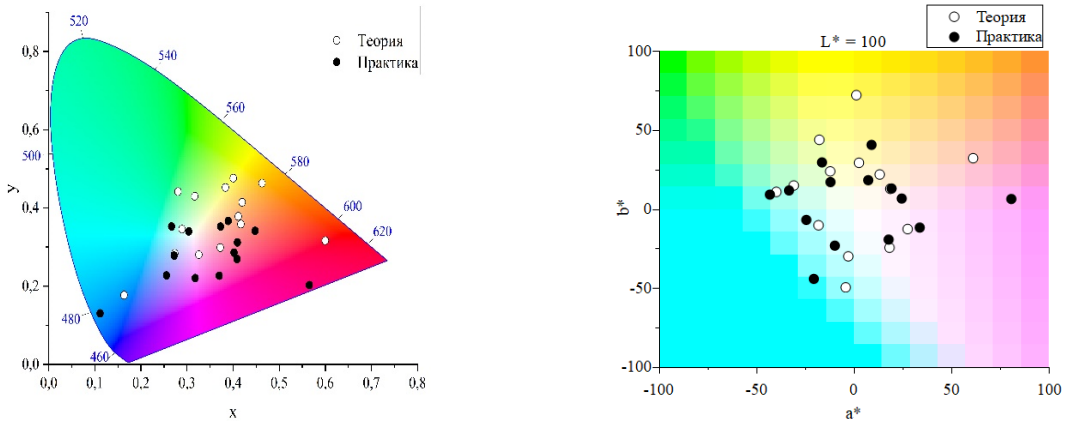
Таблица 2

Результаты расчета

Коор. цвета	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Малой насыщенности								Насыщенные				Специальные	
	Преобразование от А к В													
	Теория													
L^*	62,2	61,2	62,1	60,5	61,7	60,7	61,2	63,4	42,4	82,1	51,2	28,9	81,0	40,8
a^*	18,3	2,3	-18,0	-31,1	-18,4	-3,2	17,9	27,2	60,7	1,0	-40,0	-4,5	12,9	-12,5
b^*	13,2	29,6	44,2	15,3	-9,9	-29,6	-24,1	-12,3	32,5	72,4	11,2	-49,2	22,2	24,2
	Практика													
L^*	62,9	61,8	62,7	60,2	61,0	59,6	60,7	63,4	43,7	83,5	50,5	25,9	81,8	41,1
a^*	24,2	7,0	-16,6	-33,5	-24,7	-10,1	17,5	33,4	80,3	8,7	-43,3	-20,9	19,0	-12,3
b^*	7,0	18,6	29,9	12,1	-6,5	-22,8	-18,9	-11,4	6,7	41,0	9,5	-43,8	13,3	17,4
ΔE_{1994}	**6,2**	**6,4**	**5,2**	**2,6**	**4,8**	**6,3**	**2,7**	**3,2**	**15,2**	**8,9**	**1,9**	**10,3**	**7,7**	**3,6**
Допустимое откл. от 6 ед., раз	**1,0**	**1,1**	**0,9**	**0,4**	**0,8**	**1,0**	**0,5**	**0,5**	**2,5**	**1,5**	**0,3**	**1,7**	**1,3**	**0,6**
Коор. Цвета	Преобразование от А к С													
	Теория													
L^*	61,6	60,7	62,0	61,0	62,3	61,4	61,2	63,0	40,4	81,3	51,9	30,5	80,4	40,7
a^*	16,5	-0,8	-21,5	-32,9	-16,6	1,1	20,8	27,6	57,3	-4,8	-41,4	3,2	10,2	-14,3
b^*	12,0	29,4	44,9	17,2	-8,6	-28,6	-24,6	-13,6	28,8	72,5	13,4	-46,1	21,4	24,5
	Практика													
L^*	62,4	61,7	63,0	60,8	61,4	59,8	60,4	62,7	41,5	83,3	51,2	26,3	81,4	41,4
a^*	26,4	7,7	-18,0	-36,2	-26,7	-10,9	19,1	36,6	89,9	9,5	-46,6	-22,5	20,7	-13,4
b^*	5,2	17,1	29,0	13,2	-5,0	-21,4	-19,0	-12,7	0,3	37,7	11,1	-41,6	11,5	17,1
ΔE_{1994}	**8,5**	**8,6**	**5,6**	**3,3**	**7,0**	**9,7**	**2,9**	**4,5**	**18,9**	**11,4**	**2,8**	**16,0**	**10,7**	**3,8**
Допустимое откл. от 6 ед., раз	**1,4**	**1,4**	**0,9**	**0,5**	**1,2**	**1,6**	**0,5**	**0,7**	**3,2**	**1,9**	**0,5**	**2,7**	**1,8**	**0,6**
	Преобразование от А к D65													
	Теория													
L^*	61,5	60,7	62,1	61,2	62,4	61,5	61,1	62,8	40,0	81,3	52,3	30,5	80,3	40,8
a^*	17,5	0,1	-20,7	-33,2	-17,5	-0,4	20,2	27,5	59,0	-3,0	-42,4	1,3	11,4	-13,9
b^*	11,8	29,1	44,6	17,1	-8,5	-28,4	-24,5	-13,5	28,3	71,8	13,6	-46,4	21,2	24,4
	Практика													
L^*	62,3	61,7	63,1	60,9	61,5	59,8	60,3	62,6	41,2	83,3	51,4	26,3	81,3	41,4
a^*	26,8	7,8	-18,3	-36,7	-27,1	-11,1	19,4	37,1	91,5	9,6	-47,2	-22,8	21,0	-13,5
b^*	5,2	17,3	29,3	13,3	-5,1	-21,5	-19,2	-12,9	0,2	38,2	11,2	-41,8	11,6	17,3
ΔE_{1994}	**8,0**	**8,1**	**5,5**	**3,2**	**6,5**	**8,7**	**2,8**	**4,7**	**18,5**	**10,8**	**2,7**	**15,0**	**10,0**	**3,8**
Допустимое откл. от 6 ед., раз	**1,3**	**1,4**	**0,9**	**0,5**	**1,1**	**1,5**	**0,5**	**0,8**	**3,1**	**1,8**	**0,4**	**2,5**	**1,7**	**0,6**

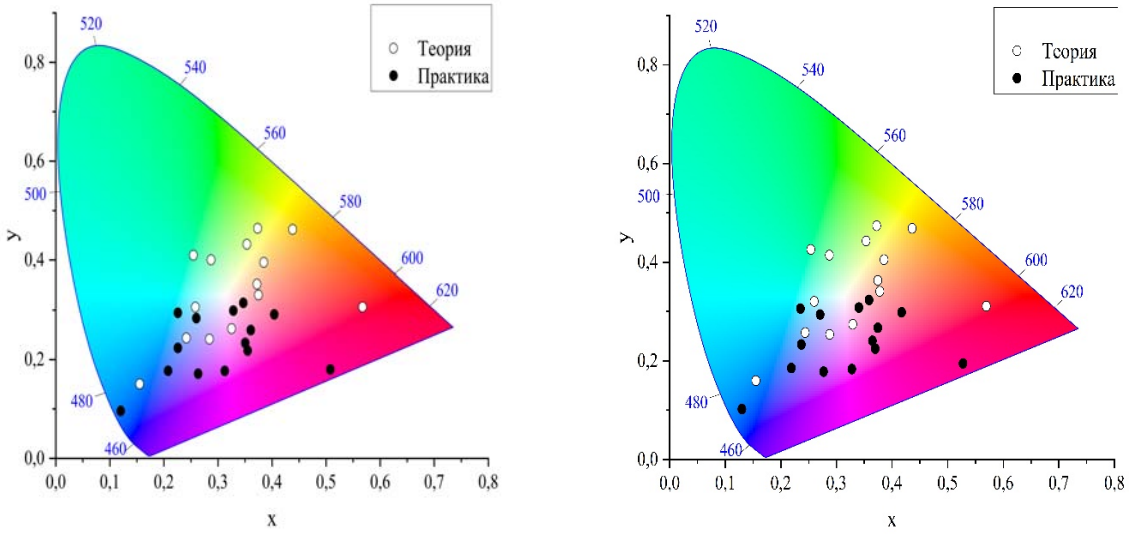
Количественные результаты исследования, представленные в табл. 2, показывают, что при преобразовании по модели фон Криса, наибольшие значения ΔE в основном преобладают в контрольных образцах с насыщенным цветом, особенно в красном (№9), превышающий значение 15 ед., однако зеленый в среднем не превышает и 2,5 ед. Эти цветовые изменения могут быть вызваны не только самой моделью преобразования фон Криса, но и несовершенством равноконтрастной системы CIELAB в различных цветовых группах [11]. Однако даже последнее не может настолько повлиять на результаты расчетов хроматической адаптации, что изменения будут доходить до 19 ед.

Если рассматривать превышение цветового различия в зависимости от источника, к которому происходит пересчет, то значения преимущественно выше при переходе к стандартному источнику типа С, чем к типа В (см. рис. 3).



а *б*

Рис. 1. Координаты цветности при переходе источника от типа А к типу В: а – в системе xy; б – в равноконтрастной системе CIELAB



а *б*

Рис. 2. Координаты цветности в системе xy при переходе: а – от типа А к типу С; б – от типа А к типу D65

В современной полиграфии величина предела соответствия цвета репродукции оригиналу находится от 2 до 6 единиц [12]. Именно поэтому значение 6 ед. выбрано как допустимое отклонение. Относительно него определяли во сколько раз превышено цветовое различие для каждого цвета (см. табл. 2). Сравнивая полученные значения, можно видеть, что наибольшие изменения происходят при преобразовании от исходного состояния А к состоянию С. В этом случае значения колеблются от 0,5 до 3,2 раза, что указывает на значительные цветовые изменения.

Анализируя значения из табл. 2, можно сделать следующие выводы:

1. Наименьшие различия в цвете были зарегистрированы для пары цветов №11 и №12, где значение ΔE_{1994} равно 1,9 при преобразовании от А к В.

2. Наибольшие различия в цвете были замечены для пары цветов №9 и №10, где значение ΔE_{1994} составляет 18,9 при преобразовании от А к С, а также для пары цветов №9 и №10 при преобразовании от источника типа А к типу D_{65}, где значение ΔE_{1994} также равно 18,5.

3. В целом, значения ΔE_{1994} для преобразований от типа А к типу В, от типа А к типу С и от типа А к типу D65 указывают на значительные различия в цвете.

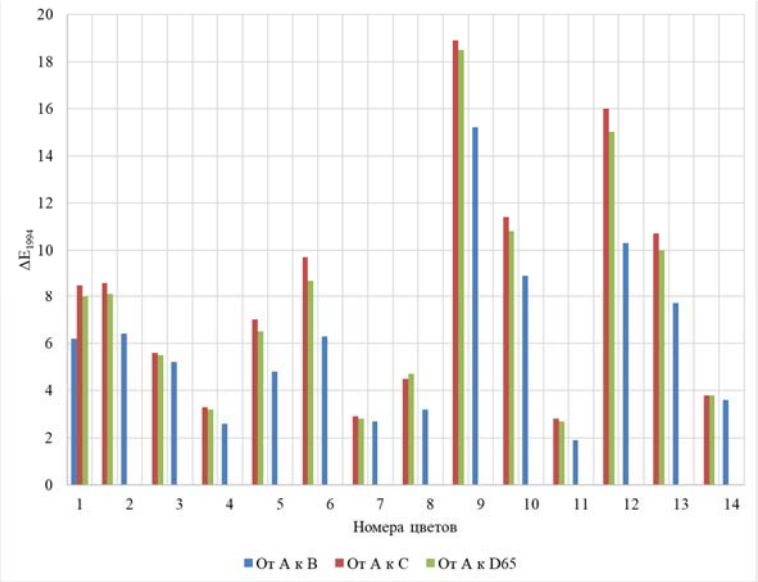


Рис. 3. Хроматическая адаптация фон Криса при переходе к разным источникам освещения

Заключение. Количественный и качественный анализ результатов исследования указывает на значительные изменения цвета, видимые для человеческого зрения. Значения ΔE_{1994} для каждой пары цветов варьируются от 1,9 до 15,2 при преобразовании от А к В, от 2,8 до 18,9 при преобразовании от А к С и от 2,7 до 18,5 при преобразовании от А к D_{65}. Наибольшие цветовые различия были получены при переходе от источника от А к С, наименьшие – от А к В.

Это может иметь важное значение при выборе цветовой гаммы или согласовании цветов в различных приложениях, где точность цветопередачи является важным фактором. Поэтому, при проведении научных исследований с применением основ колориметрии, для получения достоверных параметров цветности лучше не преобразовывать координаты цвета относительно разных источников, а получать точные координаты цвета экспериментально или через интегральные преобразования спектральных характеристик исследуемых объектов.

Список литературы

1. Finlayson G.D., Susstrunk S. Color Ratios and Chromatic Adaptation, // Proceedings of IS&T First European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision (CGIV). pp. 7-10, 2002.

2. Wilkie A., Weidlich A. A Robust Illumination Estimate for Chromatic Adaptation in Rendered Images // Computer Graphics Forum. 2009. 28(4). P. 1101–1109. DOI:10.1111/j.1467-8659.2009.01487.x.

3. Dejana Dordevic, Ales Hladnik, Andrej Javorsek. Performance of Five Chromatic Adaptation Transforms Using Large Number of Color Patches // ACTA GRAPHICA Journal for Printing Science and Graphic Communications. 2009. P. 9-19.

4. Hirakawa K., Parks T.W. Chromatic adaptation and white-balance problem // Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. 2005. Vol.3. P. 984–987. DOI:10.1109/ICIP.2005.1530559.

5. Kerouh F., Ziou D., Lahmar K.N. Content-based computational chromatic adaptation // Conference: Internationl conference on information visualisation theory and application IVAPP. 2016.

6. Zhbanova VL. The use of mathematical packages when researching colorimetry // 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow. 2018. P. 1-4. DOI: 10.1109/INFORINO.2018.8581794.

7. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. М.: Энергоатомиздат. 1990. 240 с.

8. Zhbanova V.L. Research into Methods for Determining Colour Differences in the CIELAB Uniform Colour Space // Light & Engineering, Т. 28. №3. 2020. pp. 53-59. DOI: 10.33383/2019-005.

9. Zhbanova V.L. Evaluation and selection of color spaces for digital systems // Light & Engineering. №6. 2020. p. 86-94. DOI: 10.33383/2020-024.

10. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: учеб. пособие для вузов в 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат. 1989. 432 с.

11. Жбанова В.Л. Исследование методов определения цветовых различий в равноконтрастной колориметрической системе CIELAB // Светотехника. 2020. № 1. С. 36-40.

12. Домасев М., Гнатюк С. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб.: Питер. 2009. 224 с.

Жбанова Вера Леонидовна, канд. техн. наук, доцент, vera-zhbanova@yandex.ru, Россия, Смоленск, Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске,

Гафуров Владислав Рашидович, магистр, karpidzew@yandex.ru, Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске

CALCULATION OF CHROMATIC ADAPTATION BY THE METHOD VON CHRIS

V.L. Zhbanova, V.R. Gafurov

The monochromatic adaptation according to the von Kris model is investigated in the work. The calculation and analysis of the research results are presented. For control calculations, standard 14 colors from the Munsell atlas, adopted by the International Commission on Illumination when assessing the color rendering of radiation sources, were selected. These colors were calculated relative to standard sources of type A, B, C, D65. The color coordinates of the selected samples are also found by matrix transformations according to von Chris from type A source to sources of type B, C, D65. In the CIELAB equal-contrast system, the color differences between the color coordinates calculated integrally and through the von Kris matrices using the CIE 1994 method were determined. As a result of the research, it was revealed that the von Kris transformation model is suitable for working with low-saturated colors close to the reference white light source. However, it results in visible color changes when converting saturated colors. Therefore, when conducting scientific research, where it is important to accurately determine the color or chromaticity of an object, it is better to obtain accurate color coordinates experimentally or through integral transformations of the spectral characteristics of the objects under study, rather than using chromatic adaptation.

Key words: color, chromaticity, transformation matrix, chromatic transformations, von Kris.

Zhbanova Vera Leonidovna, candidate of technical sciences, docent, vera-zhbanova@yandex.ru, Russia, Smolensk, Branch of the National Research University "MEI" in Smolensk,

Gafurov Vladislav Rashidovich, master, karpidzew@yandex.ru, Russia, Smolensk, Branch of the National Research University "MEI" in Smolensk

УДК 681.787
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-192-193

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, КАК ВЫСОКОТОЧНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОПТИКИ

Е.Е. Майоров, В.В. Курлов, Ю.М. Бородянский, А.В. Дагаев, И.С. Таюрская

В работе рассмотрена возможность применения интерферометрии в качестве инструмента контроля оптических элементов прецизионной оптики. При изготовлении оптических систем и элементов высокого класса точности необходимо вести контроль на уровне λ/100… λ/200, поэтому исследование актуально и перспективно. В статье поставлены цель, задачи, определены метод и объект исследования. Приведены внешний вид и оптическая схема, а также технические характеристики экспериментальной интерференционной установкой, построенной на интерферометре с дифрагированным эталонным волновым фронтом. Получена интерферограмма исследуемого объекта и определены размах, среднеквадратическое отклонение объектива.

Ключевые слова: волновой фронт, интерферометр, аберрация, точность измерений, длина волны излучения, объектив.

Получение высокоточной и достоверной информации об исследуемом фронте световой волны всегда являлась значимой задачей для контроля оптических систем, деталей элементов [1]. В начале XX века бурное развитие получили бесконтактные методы, а именно, методы интерферометрии [2]. В 1918 году Твайманом были проведены экспериментальные исследования аберраций и ошибок оптических поверхностей интерференционным методом [3]. В проведенном эксперименте был предложен метод, который основывался на сравнении плоского образцового (опорного) волнового фронта с плоским волновым фронтом оптической поверхности. При поперечной расфокусировке интерферометра появляется набор интерференционных полос, форма каждой из которых соответствует профилю ошибок волнового фронта в данном сечении зрачка [4]. Данный метод имеет существенные недостатки: во-первых, при контроле оптических поверхностей большого диаметра точность снижается в разы; во-вторых, при контроле оптических систем, деталей и элементов, имеющих большие фокусные расстояния, появляется вредное влияние вибраций, которое снижает точность измерений [5]. В схеме Тваймана есть ещё один недостаток. Снижение точности измерений происходит за счет турбулентных и быстроменяющихся воздушных сред между контролируемой и образцовой системой [6].

В интерферометре Физо было максимально устранено влияние вибраций за счет введения в рабочую ветвь исследуемой оптической поверхности или системы и образцовой оптической поверхности или системы [7]. Данное совмещение стало возможным благодаря образцовой поверхности или системы, работающей в проходящем свете [8]. Низкая чувствительность к вибрациям сделала интерферометр Физо популярным при контроле оптических систем, деталей и элементов [2, 9]. Однако, у интерферометров, построенных по схеме Физо есть один существенный недостаток – это ограничение точности измерений за счет конструкции образцовой детали, которая находится на уровне λ/20 [2, 10, 11].

В последние годы повысился спрос на оптические системы и элементы высокого класса точности. Это оптико-электронные приборы и комплексы записи информации, современные исследовательские микроскопы, специальная оптико-электронная аппаратура в микроэлектроники, а также оптические системы космических телескопов [2, 12, 13]. При изготовлении таких приборов, систем и комплексов необходимо вести контроль на уровне λ/100… λ/200. Это означает, что на смену традиционным интерференционным методам и техническим средствам пришли лазерные безэталонные интерферометры с опорным волновым фронтом, сформированным путем дифракции лазерного пятна, сфокусированного на микрометрическом отверстии [2, 14, 15].

Поэтому представляет интерес исследование объектива «Юпитер 13» экспериментальной интерференционной установкой, построенной на интерферометре с дифрагированным эталонным волновым фронтом.

Целью работы явилось исследование объектива интерферометром, в котором опорный сферический волновой фронт формировался путем дифракции пучка излучения, сфокусированного на точечной диафрагме, соизмеримой по диаметру с длиной волны.

Постановка задачи. Провести контроль объектива на экспериментальной установке, построенной на интерферометре с дифрагированным эталонным волновым фронтом (дифракционный интерферометр). Используя программу Zebra Mathoptix определить размах и среднеквадратичное отклонение в микрометрах.

Метод и объекты исследования. В качестве объекта исследования был объектив «Юпитер 13». Объектив Юпитер -13, 125 мм 1,5. Объектив большого формата кроет кадр 10х15 см. Диафрагма 18 лепестков, передняя линза 82 мм, диаметр под фильтр 110 мм, по схеме Сонар, вес 2150 гр с геликоидом и блендой, посажен в геликоид с минимальной дистанцией фокусировки 90 см. Объектив с очень высоким разрешением и резкостью. Обладает очень красивым рисунком на открытой диафрагме. На рисунке 1 показан внешний вид объектива.

Контролировался объектив на интерференционной экспериментальной установке, внешний вид которой приведен на рисунке 2. Принцип интерферометра состоит в том, что на одну из поверхностей светоделителя, выполненного в виде тонкой плоско - параллельной пластинки толщиной 0,1 мм нанесено зеркальное покрытие. В центре зеркального покрытия имеется точечное отверстие, а между лазером и светоделителем пучка расположен объектив, задний фокус которого совмещен с точечным отверстием. Оно служит источником дифрагированного фронта, который является опорным. Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть результат сложения идеальной сферической волны, возникающей на точечном отверстии, и рабочей волны, отраженной от контролируемой поверхности или прошедшей дважды через исследуемый объектив в автоколлимационной схеме.

Рис. 1 Внешний вид объектива «Юпитер 13»

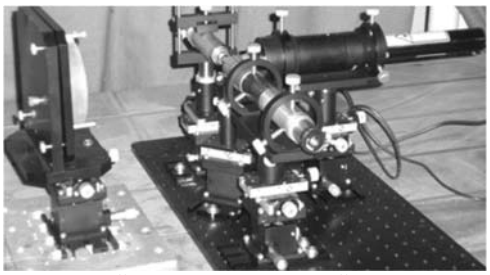


Рис. 2 Внешний вид интерференционной экспериментальной установки с дифракционным образцовым волновым фронтом

В работе приведена оптическая схема установки на рисунке 3. «Тест-объект» (светящаяся точка) 4 фокусируется исследуемой системой или деталью 6 в плоскость полупрозрачного покрытия 10 пластины 9, содержащего точечную диафрагму. Часть света, прошедшая полупрозрачное покрытие, распространяется в направлении наблюдательной системы в виде рабочего сферического волнового фронта 12, искаженного аберрациями и ошибками объекта исследования. Часть света, испытавшая дифракцию на точечной диафрагме в покрытии, распространяется в виде неискаженного сферического опорного волнового фронта 11. Результат интерференции рабочего и опорного волновых фронтов дает оптико-измерительное интерференционное изображение 13.

В таблице приведены технические характеристики установки.

Технические характеристики экспериментальной установки

Предельная инструментальная погрешность	λ/100
Апертура проверяемых поверхностей не более	0,3
Числовая апертура осветительных объективов	0,25
Числовая апертура объектива наблюдательной системы	0,3
Пределы перемещения интерференционной головки по 3-м осям, мм	± 10
Приемник изображения фотокамера	цифровая фотокамера Canon
Источник света	He-Ne лазер
Длина волны излучения, мкм	0,6328
Масса, не более (кг)	10

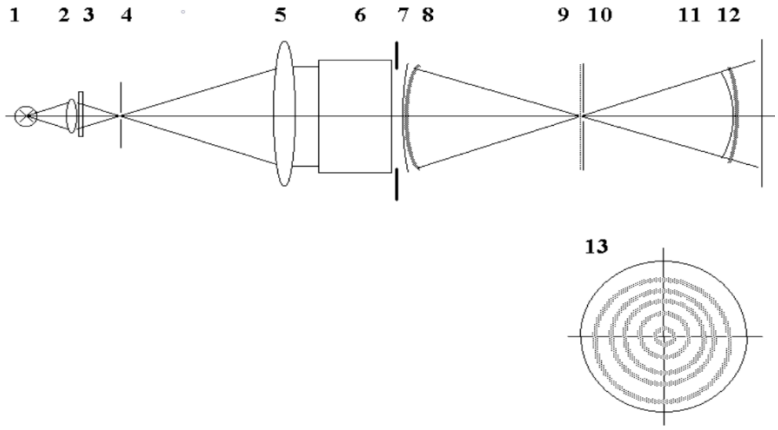


Рис. 3 Оптическая схема экспериментальной установки: 1 – источник излучения; 2 – конденсор; 3 – светофильтр; 4 – точечная диафрагма; 5 – коллиматорный объектив; 6 – исследуемая оптическая система; 7 – выходной зрачок; 8 – волновой фронт; сформированный исследуемой системой; 9 – пластинка Линника; 10 – светоделительное покрытие с точечной диафрагмой; 11 – исследуемый искаженный волновой фронт; 12 – дифрагированный сферический опорный фронт; 13 – интерференционное изображение

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Экспериментальной установкой был исследован объектив «Юпитер 13». Дифракционный интерферометр давал возможность получить интерферограмму исследуемого объекта, которая представлена на рисунке 4.

Рис. 4. Интерферограмма исследуемого объектива

Для восстановления фазы волнового фронта и топографии поверхности использовалась компьютерная программа обработки интерферограмм ZEBRA MathOPTIX. ZEBRA MathOPTIX является программой, удовлетворяющей стандартам индустриально используемых интерферометров для различных как российских, так и зарубежных производителей. Программа имеет большой набор математических и сервисных возможностей необходимых пользователю. Вся выходная информация, которая собирается, обрабатывается и выводится на монитор очень похожа программному обеспечению ведущих фирм производителей интерферометров.

Применение этой программы для исследования интерферограммы представляет интерес, так как в отличие от классических интерферометров, данные об изменении поверхности или волнового фронта здесь являются абсолютными, а не относительными.

Обработка интерферограммы производится в несколько этапов. Этап неглубокой пространственной фильтрации для удаления «мусора» из интерферограммы и этап идентификации полос – расстановка точек вдоль полос с определением возможного порядка базиса аппроксимации контролируемого волнового фронта или поверхности. Дальнейшая обработка основывается на серии математических методов интерпретации функций, целью которых является получение достоверного разложения отклонения волнового фронта или поверхности по полиномам Цернике. При этом определяются такие важные величины, как размах (peak-to-valley, R) и среднеквадратическое отклонение (RMS, σ) в микрометрах.

Для исследуемого объектива:

R = 0,201731 мкм, σ = 0,02091 мкм.

В данном случае контролировалась поверхность с малым отклонением от сферичности. Интерферограмма получена хорошего качества, чистоты и отсутствие шумов. Поэтому программа обеспечивала высокую надежность опознавания и измерения координат интерференционных полос, стабильную повторяемость выходных числовых величин, что являлось гарантией адекватности и точности конечных результатов контроля.

Заключение. В работе интерференционной экспериментальной установкой был исследован объектив «Юпитер 13» и получена интерферограмма, где в качестве эталонного волнового фронта используется волна, дифрагированная на отверстии. Компьютерной программой ZEBRA MathOPTIX были обработаны и получены значения размаха (R) и среднеквадратического отклонения (σ) в микрометрах. Исследование представляет интерес для оптического приборостроения, в частности, современной прецизионной оптотехники.

Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука. 1970. 855 с.
2. Kirillovsky V.K. Diffraction Reference Wavefront Laser Interferometer. // SPIE. The International Society for Optical Engineering Proceed. «Miniature and Microoptics: Fabrication and System Applications». 1992. Vol. 5. (1751). P. 197-200.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука. 1976. 926 с.
4. Малакара Д. Оптический производственный контроль: пер. с англ. под ред. Соснова А.Н. М.: Машиностроение. 1985. 340 с.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение. 1987. 264 с.
6. Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Недра. 1968. 263 с
7. Левин Б.М. Оптические методы определения характера профиля поверхностей // ОМП. 1938. №10 – 11, С. 37 – 41.
8. Захарьевский А.Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз. 1952. 296 с.
9. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Л.: Машиностроение. 1976. 296 с.
10. Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. М.: НИУ ИТМО, 2014. С. 195.
11. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Курлов А.В., Хохлова М.В., Кирик Д.И., Капралов Д.Д. Экспериментальное исследование метрологических характеристик автоматизированной интерферометрической системы измерения формы поверхности диффузно отражающих объектов // Измерительная техника. №10. 2017. С. 33-37.
12. Курлов В.В., Коцкович В.Б., Майоров Е.Е., Пушкина В.П., Таюрская И.С. Экспериментальное исследование разработанной интерференционной системы для измерений поверхности объектов сложной формы // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 8. С. 179-189.
13. Цыганкова Г.А., Майоров Е.Е., Черняк Т.А., Константинова А.А., Машек А.Ч., Писарева Е.А. Исследование разработанного интерферометра поперечного сдвига для настройки интерференционных полос при обработке интерферограмм // Приборы. 2021. № 2. С. 20-25.
14. Хохлова М.В., Дагаев А.В., Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Громов О.В. Исследование оптико-электронной системы при обработке голографических пластин // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 8 (110). С. 103-108.
15. Хохлова М.В., Дагаев А.В., Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Громов О.В. Интерференционная система измерения геометрических параметров отражающих поверхностей // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 6 (108). С. 184-189.

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@ramblerl.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,

Дагаев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, adagaev@list.ru, Россия, Ивангород, Ивангородский гуманитарно - технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения,

Таюрская Ирина Соломоновна, канд. экон. наук, доцент, tis_ivesep@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики

INTERFEROMETRY AS A HIGH-PRECISION INSTRUMENT FOR THE CONTROL OF OPTICAL ELEMENTS OF PRECISION OPTICS

E.E. Maiorov, V.V. Kurlov, Y.M. Borodyansky, A.V. Dagaev, I.S. Tayurskaya

The paper the possibility of using interferometry as a tool for monitoring optical elements of precision optics is considered. When manufacturing optical systems and high-class precision elements, it is necessary to control at the level of λ/100... λ/200, therefore, the study is relevant and promising. The article the goal are set, objectives, the method and object of research are defined. The appearance and optical scheme, as well as the technical characteristics of an experimental interference installation built on an interferometer with a fragmented reference wavefront are presented. An interferogram of the object under study was obtained and the scope and standard deviation of the lens were determined.

Key words: wavefront, interferometer, aberration, measurement accuracy, radiation wavelength, lens.

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),

Borodyansky Yuriy Mihailovich, candidate of technical sciences, docent, borodyanskyum@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,

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 531.57
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-196-197

ДЕКОМПОЗИЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАЛОКАЛИБЕРНОГО АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВЫСТРЕЛА

И.А. Подкопаев, А.В. Подкопаев, В.И. Должиков

Представлена формализация физических процессов, связанных с ускорением снаряда в малокалиберном артиллерийском стволе (далее – ствол), детально разделяющая формы исходных данных, вид решающих правил основной задачи внутренней баллистики (ОЗВБ) и их последовательности на основе конкретизации газодинамических параметров пороховых газов (далее – газы). Частные блоки предлагаемой декомпозиционной математической модели внутренней баллистики (далее – модель) сгруппированы в компактный вид, допускающий их согласование при последовательном абстрагировании адиабатного расширения газов в стволе. Значительное внимание уделено оценке точности модели, с учетом приоритета нормированной информации, содержащейся в эксплуатационной документации (ЭД) на объект исследования.

Ключевые слова: параметры состояния газов, закон горения пороха, допущение, группировка параметров, метод Рунге – Кутта.

Проблема корректного уточнения решений ОЗВБ представляет собой центральную проблему теоретических и экспериментальных исследований артиллерийской науки. Сложность процесса выстрела и недостаточно достоверные знания отдельных явлений, совершающихся при выстреле, обусловливают введение нескольких допущений, упрощающих математическое описание физических процессов выстрела. Допущения ОЗВБ, относящиеся к основным допущениям пиро-, газо- и термодинамики, обоснованны в фундаментальных трудах, воспроизведенных, например в [1–3], а также структурируют прикладные работы предметной области знаний, например [4–7].

Стремление, направленное на продолжение достижений отечественной школы внутренней баллистики, по праву занимающей передовые позиции, вынуждает компенсировать, а при наличии объективных оснований и снимать некоторые допущения.

Известно, что при заданных конструктивных характеристиках авиационного артиллерийского оружия (ААО) и боеприпаса к нему, ОЗВБ имеет единственно существующее решение: строго определенную кривую изменения давления газов p, единственную кривую нарастания скорости снаряда (газов) v, а в теплофизической постановке и кривую убывания температуры газов T. Так как наиболее интересным с точки зрения повышения точности решения ОЗВБ является приближение каждой из указанных кривых к их возможно существующему точному количественному виду, то в качестве основополагающего использован декомпозиционный подход к построению модели.

В силу научных интересов авторов, расчет параметров состояния газового потока при выстреле осуществлен применением научно-методического аппарата проф. Б.В. Орлова, в части касаемой автоматических артиллерийских орудий [2], который усовершенствован путем получения уточненных данных по начальным, текущим условиям движения снаряда (газов) в канале ствола и организации вычислений. Применительно к традиционным схемам горения пороха и движения снаряда (газов), система уравнений внутренней баллистики ААО дополнительными преобразованиями сведена к виду:

$$\left.\begin{aligned}
&ps(l_\psi + l) + \theta\frac{\varphi q}{2g}v^2 = f\omega\psi;\\
&\frac{\varphi q}{g}\frac{dv}{dt} = sp;\quad \frac{dl}{dt} = v;\\
&\frac{dz}{dt} = \frac{u_1}{e_1}p = \frac{p}{J_к};\\
&\psi = \chi z\left(1 + \lambda z + \mu z^2\right);\\
&\sigma = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2;\\
&\frac{d\psi}{dz} = \chi\sigma;\\
&l_\psi = \frac{1}{s}\left[W_{кам} - \frac{\omega}{\delta}(1-\psi) - \alpha\psi\omega\right];\\
&\frac{T}{T_г} = 1 - \frac{\theta}{f\omega\psi} - \frac{\varphi q v^2}{2g},
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где s – площадь поперечного сечения канала ствола, включая нарезы, м^2; l_ψ – приведенная длина свободного объема каморы к моменту сгорания в ней части заряда ψ; l – длина ствола, м; θ – исключение из единицы показателя адиабаты газов γ (θ = γ – 1); φ – коэффициент фиктивности массы снаряда; q – вес снаряда, Н; g – ускорение свободного падения тела, м/с^2; f – сила пороха, кг·м/кг; ω – вес заряда, Н; ψ – относительная часть сгоревшего пороха; z – относительная толщина пороха; u_1 – скорость горения пороха при технической атмосфере, м/с; e_1– половина толщины пороха, м; $J_к$ – импульс давления газов, кг/м^{2}с; χ, λ, μ – характеристики формы пороха; σ – относительная поверхность пороха; $W_{кам}$ – объем каморы, м^3; δ – плотность пороха, кг/м^3; α – коволюм газов, м^3/кг; $T_г$ – температура горения пороха, К.

Подробный вывод системы уравнений (1) и ее различных интерпретаций приведен во многих источниках, например, [1–3]. В настоящей работе рассмотрены только процедуры, необходимые для локализации математического описания физических процессов выстрела.

Величина текущей относительной части сгоревшего пороха ψ по существу является независимой переменной в уравнении Резаля системы уравнений (1), так как только в результате изменения величины $d\psi/dz$ (то есть горения пороха) и возникает давление газов p, сообщающее движение снаряду.

Коэффициент фиктивности массы снаряда в уравнении Резаля и далее в уравнениях системы (1) рассчитывается по формуле

$$\varphi = \mathrm{K} + \frac{1}{3}\frac{\omega}{q},$$

где K – коэффициент суммы всех работ, совершаемых газами при выстреле, кроме работы на перемещение газов и заряда, отдельно выраженной через $\frac{1}{3}\frac{\omega}{q}$ (для пушек средней мощности K = 1,04).

Уравнение движения снаряда в канале ствола позволяет установить связь между скоростью снаряда v и кривыми давления газов p в функции длины ствола l и времени t. Уравнения движение снаряда в канале ствола в производных dl/dt и dv/dt представлены в форме, подходящей для построения графиков $v(l)$ и $v(t)$.

В соответствии с одним из принятых допущений, важнейшая закономерность скорости горения пороха u от давления газов p, определяющая закон газообразования, представленав системе уравнений (1) функциональной зависимостью геометрического закона горения порохов

$$u = \frac{de}{dt} = e_1\frac{dz}{dt} = u_1 p. \qquad (2)$$

Формула (2) справедлива для условия достижения максимального давления газов $p_{max} > 300$ МПа.

Геометрический закон горения, установленный для порохов дегрессивной формы $(d\sigma/dt) < 0$, например, лента или пластина, несомненно, не полностью отвечает действительности в сравнении с описанием механизма горения многоканальных порохов прогрессивной формы $(d\sigma/dt) > 0$ физическим законом горения. В некоторых случаях наблюдаются отклонения в горении многоканальных порохов прогрессивной формы от геометрического закона горения, так как в узких каналах порохового зерна создаются особые условия неравномерного горения внутри каналов и на наружной поверхности. При горении пороха со многими каналами наблюдается распад зерна и продолжение горения – явления, которое по природе отсутствует в дегрессивных порохах с одним каналом или без каналов. Флегматизованные пороха с неравномерным распределением флегматизатора по толщине зерна труднее воспламеняются и горят с переменной скоростью горения пороха u. Однородность структуры наружных слоев у пироксилиновых порохов нарушается при вымочке в процессе их изготовления, поэтому скорость горения пороха u в этом случае меняется по более сложному закону.

Вместе с тем еще в работе [1] отмечено, что для пироксилиновых порохов закон скорости их горения $u = u(p)$ во всем диапазоне давлений газов 5 МПа ≤ p ≤ 600 МПа можно разделить на два участка, как показано на рис. 1: участок I – для интервала 5 МПа ≤ p < 40 МПа; участок II – для интервала 40 МПа ≤ p ≤ 600 МПа.

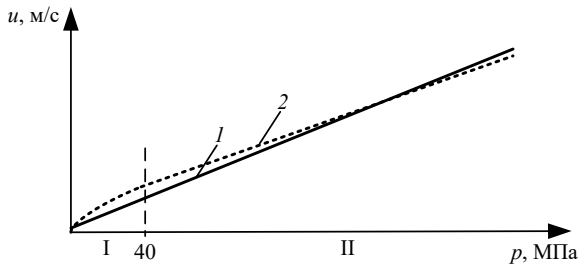


Рис. 1. Зависимость скорости горения порохов от давления газов при геометрическом и физическом законах

В стволе пироксилиновые пороха горят в основном при давлении газов p = 300…600 МПа. На участке I рис. 1, включающем величину давления форсирования $p_0 \approx 30$ МПа, скорость горения пороха u при геометрическом законе *1* с ростом давления газов p увеличивается медленнее, чем физическом *2*. На участке II, соответствующему первому и второму периодам выстрела, различие между геометрическим *1* и физическим *2* законами скорости горения порохов становится несущественным. В итоге, для участка II вполне возможно с одинаковым приближением провести и прямую геометрического *1* и вырожденную параболу физического *2* законов скорости горения порохов. Другими словами, графики зависимости скорости горения порохов u от давления газов p для интервала 40 МПа ≤ p ≤ 600 МПа при геометрическим *1* и физическим *2* законах весьма близки и по форме стремятся друг к другу. Вследствие приоритетности допущения о пиростатичности предварительного периода выстрела (нахождении снаряда на месте до момента достижения в гильзе давления форсирования $p_0 \approx 30$ МПа), участок I во внимание может не приниматься.

С учетом известной связи относительной толщины с половиной толщины пороха

$$z = e / e_1, \tag{3}$$

скорость горения пороха выражается формулой, аналогичной формуле (2)

$$u = u_1 p.$$

Несмотря на то, что при физическом законе прогрессивность горения порохов определяется не только формой зерна, но и плотностью заряжания Δ, учет неравномерности условий горения на наружной поверхности и внутри каналов пороха с изменением этой величины при конструктивно постоянных условиях заряжания не обязателен. Погрешности геометрического закона горения порохов могут быть восполнены поправками, введенными в работах [1–3].

Равные значения максимального давления газов p_{max} достигаются при соотношении толщин порохов

$$(2e_1)_с \approx 0{,}7(2e_1)_т, \tag{4}$$

где индексы «с» и «т» в обозначениях толщины пороха $2e_1$ относятся к семиканальному и трубчатому порохам, соответственно.

Толщина порохового зерна семиканального пороха $(2e_1)_с$, эквивалентному ленточному составляет

$$(2e_1)_с \approx 0{,}75(2e_1)_л, \tag{5}$$

где индекс «л» в обозначении толщины пороха $2e_1$ относится к ленточному пороху.

С целью повышения точности исходных данных вводится также и множащая поправка на импульс давления газов, зависящий от геометрии пороха и величины u_1 скорости его горения при технической атмосфере

$$J_к = \int_0^{e_1} \frac{de}{u_1} = \frac{e_1}{u_1}. \tag{6}$$

Вспомогательная зависимость $d\psi/dz$ в системе уравнений (1) получена дифференцированием трехчленной зависимости $\psi(z)$ по z и подстановкой трехчленной зависимости $\sigma(z)$ в указанный дифференциал.

Очевидно, что уравнения движения снаряда и уравнения для закона горения пороха сформированы для нахождения связи между четырьмя переменными, входящими в уравнение Резаля, так как на процесс выстрела влияют все перечисленные выше переменные, связанные между собой и оказывающие взаимовлияние.

Величина l_ψ приведенной длины свободного объема каморы к моменту сгорания в ней части заряда ψ выражена в системе уравнений (1) через известный объем каморы $W_{кам}$.

Особенность расчета предварительного периода выстрела проявляется в одном из допущений, исходя из которого снаряд стоит на месте ($v = 0$) в постоянном объеме ($W_{кам} = \text{const}$) до достижения давления форсирования $p_0 \approx 30$ МПа. При этом необходимо, чтобы сгорела относительная часть пороха ψ. Связь между давлением форсирования p_0 и соответствующей ему относительной частью пороха, сгоревшего на момент окончания периода форсирования (к началу движения снаряда (газов)), устанавливается совместной формулой пиростатики

$$\psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{p_0} + \alpha - \frac{1}{\delta}}.$$

Формула для относительной толщины пороха, сгоревшего на момент окончания периода форсирования, имеет приближенный вид

$$z_0 \approx \psi_0 / \chi.$$

Таким образом, изменение давления форсирования p_0 косвенно учитывается величиной относительной части пороха ψ_0, и соответствующей относительной толщиной пороха z_0, сгоревшего к началу движения снаряда (газов).

Температура газов T, необходимая для модели в теплофизической постановке и заключающая систему уравнений (1), определяется на основании первого закона термодинамики [1, 2].

Таким образом, система уравнений (1) включает семь неизвестных величин, три поправки вида (4) – (6) и имеет единственное решение при следующих начальных условиях: $p = p_0$, $\psi = \psi_0$, $v_1(t_0) = 0$, $l(t_0) = 0$, $t_0 = 0$. Система уравнений (1) решается методом численного интегрирования и справедлива в течение всего времени движения снаряда (газов) по каналу ствола t. Для второго периода выстрела, когда после окончания горения пороха происходит адиабатическое расширение газов, относительная часть сгоревшего пороха ψ в системе уравнений (1) полагается $\psi = 1$.

В системе уравнений (1), в диапазоне от температуры горения пороха $T_г$ до температуры газов у дульного среза $T_д$, величина θ, как правило, приводимая в соответствие среднему значению $\bar{c}_w$ величины c_w коэффициента удельной теплоемкости при постоянстве удельного объема газов ($w = \text{const}$), также постоянна. На самом деле значения показателя адиабаты газов θ, зависящие от состава газов, убывают в убывающем интервале указанных температур. Так как $T_д/T_г \approx 0{,}65$ и изменения величины θ, не слишком значительны, то в большинстве методов решения ОЗВБ принимается усредненное значение величины $\theta \approx 0{,}2$. Постоянство показателя адиабаты газов θ объясняется требованиями временно́го обеспечения интегрирования систем уравнений вида (1) при переходе от менее к более точным уравнениям при располагаемых ресурсах вычислителей.

Вместе с тем в работах различных авторов для коэффициента θ приводятся его разные значения, тогда как по наиболее точным данным, представленным в таблице [3], различие в значениях θ наблюдается уже во втором знаке после запятой, что, естественно, не может не отразиться на результатах расчетов.

Значения величины θ при значениях температуры горения пороха $T_г$ и температуры газов T

$T/T_г$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,1
T, K	2700	2430	2160	1890	1620	1350	270
θ	0,185	0,190	0,196	0,202	0,208	0,215	0,252

Кроме того, величины c_w – коэффициента удельной теплоемкости газов при w = const и c_p – коэффициента удельной теплоемкости газов при p_1 = const также не постоянны. В частности, на участке высоких температур газов 1800 K ≤ T ≤ 3000 K значения величины c_w изменяются по зависимости, сходной с линейной. На интервалах более низких температур газов T < 1800 K они выражаются более сложными зависимостями, чем линейные.

Следовательно, конкретизация способа решения ОЗВБ должна быть такой, которая при наличии достаточных теоретических и экспериментальных материалов, незначительная доля которых представлена выше в авторском варианте, позволила бы в сопоставимых кодах и максимальной точностью рассчитывать параметры состояний газов. Тогда для коэффициента θ правильнее брать из таблицы разные значения в первом и во втором периодах выстрела: меньшее значение для первого периода, в котором охлаждение газов еще невелико, и большее – для второго периода, в котором газы охлаждены больше.

Предлагаемый подход достаточно простой, а данные таблицы известны давно. Однако сопряжение модели с блоками проверки соответствующих условий расчетных программ и получение достоверных результатов несколько затруднено. Затруднения связаны с ограниченными возможностями достоверного комплексирования исходных данных при отладке участков-калькуляторов программ на вычислителях со средними характеристиками. Недостаточная формализуемость физического закона горения пороха при использовании как математических методов дедукции из аксиом – от общего к частному, так и эвристических методов индукции – от частного к общему, сводится к многократным итерациям как поправок (4) – (6), компенсирующих недостатки геометрического закона горения порохов (2), так и компиляции исходных данных, представленных в виде таблице. Перечисленные обстоятельства ставят точность результата решения ОЗВБ в зависимость от мастерства программиста.

При этом вводить поправку на снижение температуры газов T и понижение их работоспособности из-за теплоотдачи в стол, увеличивая коэффициент фиктивности массы снаряда φ, нельзя. Тогда, согласно уравнению Резаля, возрастает максимальное давление газов $p_{\max}$ и уменьшается дульная скорость снаряда (газов) $v_д$, а теплоотдача, хотя и в разной степени, уменьшает эти величины. В большинстве решений теплоотдача учитывается косвенно, увеличением показателя адиабаты газов θ, или уменьшением силы пороха f. Какие-либо изменения значений показателя адиабаты газов θ, не соответствующие данным, заявленным в таблице, здесь неприемлемы.

Следовательно, уменьшение общей энергии газов возможно отнесением к величине силы пороха f, посредством снижения значения температуры горения пороха $T_г$ на величину корректировки $\Delta T_г$, заявляемой в большинстве источников

$$\frac{\Delta T}{T_г} = \frac{C_M}{7{,}774}\frac{s}{W_{кам}}\frac{1}{\Delta}\frac{v}{v_к}\left(1+\frac{\xi_s}{3}\Lambda\right), \tag{7}$$

где C_M – эмпирический коэффициент, зависящий от природы и геометрии пороха, а также от скорости снаряда (газов) v; $v_к$ – скорость снаряда (газов) на момент окончания горения пороха, определяемая в процессе интегрирования системы уравнений (1); ξ_s – коэффициент, учитывающий относительное увеличение площади поперечного сечения канала ствола, включая нарезы s (ξ_s = 1,2 ...1,3); Λ – относительный путь снаряда (газов) в канале ствола.

Величина $\frac{C_M}{7{,}774}\frac{s}{W_{кам}}\frac{1}{\Delta}$ в формуле (7) учитывает потерю тепла, которая получилась бы при условии сгорания пороха в каморе при неподвижном снаряде. Множитель $\frac{v}{v_к}\left(1+\frac{\xi_s}{3}\Lambda\right)$ в формуле (7) учитывает увеличение потери тепла вследствие постепенного увеличения охлаждающей поверхности в относительном пути снаряда (газов) в канале ствола $\Lambda = l/l_0$. Здесь приведенная длина каморы рассчитывается по элементарной зависимости $l_0 = W_{кам}/s$.

При распространенном относительном значении коэффициента C_M = 2%, установленном из опытов в манометрической бомбе, формула (7) изначально дает заниженные результаты, так как учет влияния скорости снаряда (газов) v на потерю тепла в канале ствола не вполне точен. Более того, факт меньших значений силы пороха f, определяемых в физическом законе горения порохов при опытах с коническими крешерами, по сравнению с этими же значениями при опытах с цилиндрическими датчиками в геометрическом законе горения порохов, не опровергнут. В целом на предварительных расчетах при несколько отличающихся графиках давления p и скорости v газов от длины ствола l, площади кривых оказываются равными, а значения дульных скоростей снаряда (газов) $v_д$ одинаковыми. Однако промежуточные значения исследуемых параметров отличны от реальных.

Исходя из обсужденных положений, значение анализируемого коэффициента $C_M \neq 4{,}5\%$, то есть не увеличивается более чем в 2,25 раза от первоначального, как рекомендуется в работах [1, 3], а подбирается в пределах 2,5% ≤ C_M ≤ 3,5% в зависимости от усредненных значений толщины пороха $2e_1$ поправками вида (4) и (5). Таким образом, первичное уточнение исходных данных предопределяет выполнение главного требования к интегрированию системы уравнений (1), что также способствует повышению точности пиродинамических расчетов.

Определенные выгоды при программировании системы уравнений (1) дает переход к аргументу $x = v/v_к$, так как в течение предварительного и первого периодов выстрела $0 \le x \le 1$.

Из второго уравнения системы (1) следует соотношение

$$v = \frac{gs}{\varphi q} J_к (z - z_0),$$

откуда

$$z = z_0 + (1 - z_0)x.$$

Из третьего уравнения системы (1) время исключено простым преобразованием

$$\frac{dl}{dt} = \frac{dl}{dx}\frac{dx}{dt} = \frac{dl}{dx}\frac{p}{(1-z_0)J_к}.$$

Тогда

$$\frac{dl}{dx} = \frac{(1-z_0)J_к}{p} v_к x.$$

Вводя в расчеты параметр условий заряжания проф. Н.Ф. Дроздова, группирующий некоторые константы выстрела

$$\mathrm{B} = \frac{s^2 J_{\text{к}}^2 g}{f\omega\varphi q},$$

систему уравнений (1) при аргументе x можно представить следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}
& ps(l_\psi + l) = f\omega\left[\psi - \frac{\mathrm{B}\theta}{2}(1-z_0)^2 x^2\right]; \\
& v = v_{\text{к}} x; \\
& \psi = \chi z\left(1 + \lambda z + \mu z^2\right); \\
& \sigma = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2; \\
& \frac{d\psi}{dz} = \chi\sigma; \quad z = z_0 + (1-z_0)x; \\
& \frac{dl}{dx} = \frac{(1-z_0)J_{\text{к}}}{p} v_{\text{к}} x; \frac{dt}{dx} = \frac{(1-z_0)J_{\text{к}}}{p}; \\
& l_\psi = \frac{1}{s}\left[W_{\text{кам}} - \frac{\omega}{\delta}(1-\psi) - \alpha\psi\omega\right]; \\
& \frac{T}{T_{\text{г}}} = 1 - \frac{\theta}{f\omega\psi} - \frac{\varphi q v^2}{2g}.
\end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

Так как в формуле теплофизической постановки ОЗВБ (7) присутствует переменная относительного пути снаряда (газов) Λ, то совершенно естественным следует переход от системы уравнений (8) к системе уравнений вида:

$$\left.\begin{aligned}
& p[L(x) + \Lambda] = f\Delta\left[\psi - \frac{\mathrm{B}\theta}{2}(1-z_0)^2 x^2\right]; \\
& v = v_{\text{к}} x; \\
& \psi = \chi z\left(1 + \lambda z + \mu z^2\right); \\
& \sigma = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2; \\
& \frac{d\psi}{dz} = \chi\sigma; \quad z = z_0 + (1-z_0)x; \\
& \frac{d\Lambda}{dx} = A(x) + K(x)\Lambda; \\
& \frac{dt}{dx} = l_0\sqrt{\frac{\mathrm{B}f\varphi q}{g\omega}}\frac{\Delta}{p}(1-z_0); \\
& \frac{T}{T_{\text{г}}} = 1 - \frac{\theta}{f\omega\psi} - \frac{\varphi q v^2}{2g},
\end{aligned}\right\} \qquad (9)$$

где

$$K(x) = \frac{\mathrm{B}(1-z_0)^2 x}{\psi - \frac{\mathrm{B}\theta}{2}\mathrm{B}(1-z_0)^2 x^2};$$

$$L(x) = 1 - \frac{\Delta}{\delta} + \psi\Delta\left(\alpha - \frac{1}{\delta}\right);$$

$$A(x) = K(x)L(x).$$

Повторение в системе уравнений (9) группировок параметров $K(x)$ и $L(x)$ значительно упрощает составление программы решения ОЗВБ на вычислительной машине.

Решение ОЗВБ проведено способом установления связи между геометрией пороха и образованием газов для штатного пороха, применяемого для снаряжения унитарного и наиболее распространенного патрона с осколочно-фугасно-зажигательным снарядом ОФЗ-30 [8] к ААО типа ГШ-301 [9]. Основные энергетические и геометрические характеристики порохов приводятся в специальных справочниках или приложениях учебной литературы [1, 2, 10].

Численное интегрирование системы уравнений внутренней баллистики (9) выполняется модификациями метода Рунге – Кутта, так как предварительные расчеты показали, что в силу устойчивости схемы, решения по выбранному методу можно устанавливать сравнительно большими диапазонами шага интегрирования $\Delta\tau$ по времени t. Применение методов Рунге – Кутта на вычислительной машине делает возможным проведение большого числа операций за короткое время.

Предварительный период выстрела решается одним из методов Рунге – Кутта первого порядка – методом Эйлера. Одношаговый метод интегрирования дифференциальных уравнений, разработанный Эйлером, наиболее прост и заключается в переходе от точки к точке по прямой линии. В целом, базисом программы решения системы уравнений (9) служит метод Рунге – Кутта четвертого порядка.

На предварительном периоде выстрела шаг интегрирования системы уравнений (9) с аргументом времени $\Delta\tau$ устанавливается опцией автоматического выбора шага, предусмотренной в любой современной среде программирования. На первом и втором периодах выстрела, в соответствии с рекомендациями [2], при соотнесении со временем выстрела из авиационной пушки ГШ-301 и исходя из функциональной зависимости скорости снаряда (газов) v_1 от длины ствола l, шаг интегрирования системы уравнений (9) принят переменным, равным $\Delta\tau = 0{,}0002\dfrac{l}{v(l)}$ и далее уточняется в процессе баллистического расчета.

Программа решения ОЗВБ включает две основные части, следующие при счете непосредственно одна за другой. В первой части программы рассчитываются константы процесса выстрела и выполняется пересчет зависимости p (t) в отношения давления газов p от относительной толщины пороха z, определяемой по формуле (3). Во второй части программы производится интегрирование системы уравнений (9) с указанным выше шагом $\Delta\tau$.

Интегрирование времени движения снаряда по каналу ствола t при вычислении ряда параметров аналитическими формулами осуществляется методом трапеции, интегрированием уравнений $dt/dz = J_к/p$ или $dt/dl = 1/v$. В начальной точке при давлении форсирования $p_0 = 0$ производные dt/dz и dt/dl и обращаются в бесконечность. При исходном вычислении времени движения снаряда по каналу ствола t, начиная от давления форсирования p_0 = 30МПа, выделяется малый начальный участок длиной $0{,}1l_0$ и время движения по нему определяется отдельно. На первом и втором периодах выстрела вычисления проводятся по ординарной схеме.

Проверка достоверности разработанной модели осуществлена сравнением полученных результатов с данными испытаний, итоги которых отражены в ЭД на авиационную пушку ГШ-301 [9] и патрон с осколочно-фугасно-зажигательным снарядом ОФЗ-30 [8].

Графики зависимостей, демонстрирующих основные закономерности движения снаряда (газов) в стволе авиационной пушки ГШ-301, представлены на рис. 2 и рис. 3.

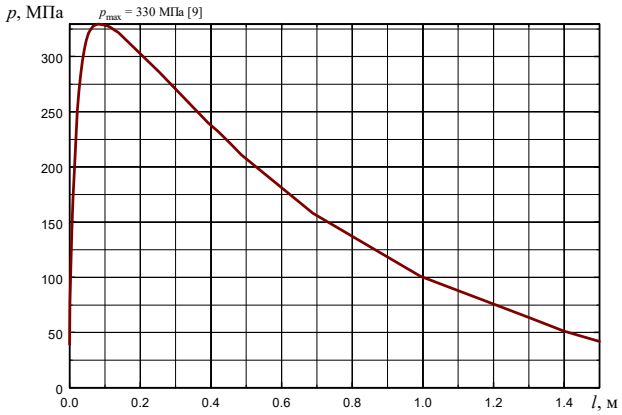


Рис. 2. Зависимость давления газов от длины ствола

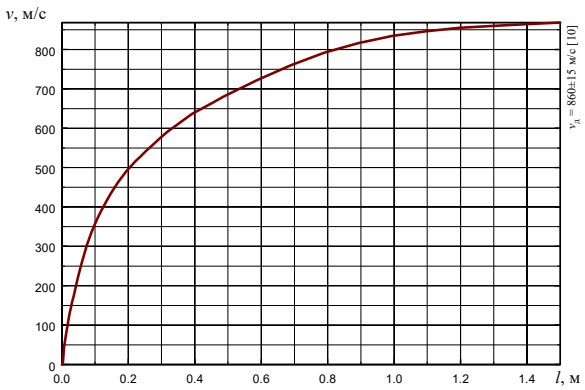


Рис. 3. Зависимость скорости снаряда (газов) от длины ствола

На графике рис. 2 отчетливо прослеживается практически полное отсутствие того характерного излома при уменьшении давления газов p, который обычно наблюдается при решении ОЗВБ на основе геометрического закона горения в прямой постановке. Нельзя не отметить факт наилучшего схождения значений максимального давления газов p_{max} к данным, указанным в ЭД на боеприпас [8]. Так, в настоящей работе значение важнейшего параметра выстрела достигает величины 329 МПа, что практически соответствует его нормированному значению 330 МПа.

Скорость снаряда (газов) v доходит до своего максимума у дульного среза, как показано на рис. 3. В данной работе получены результаты расчета дульной скорости снаряда (газов) $v_д$ = 868 м/с, наиболее близкие к паспортным данным авиационной пушки ГШ-301. Значение анализируемой характеристики, назначенное на объект исследования в ЭД [9], составляет 860±15 м/с.

Результаты расчета температуры газов T, изменяющейся по длине ствола l авиационной пушки ГШ-301 приведены на рис. 4.

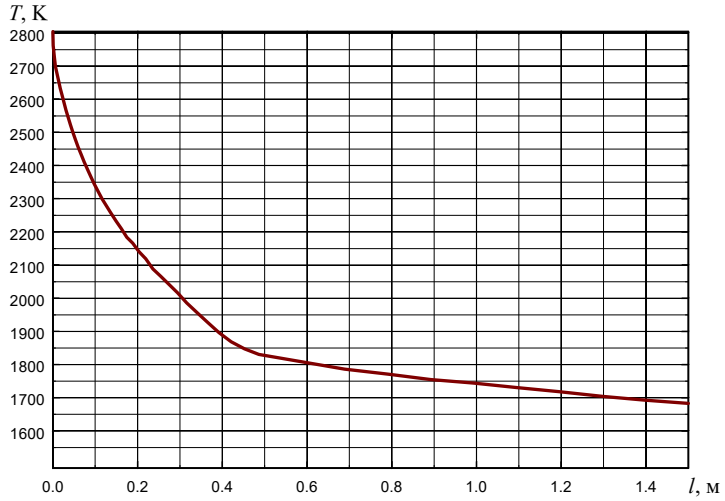


Рис. 4. Зависимость температуры газов от длины ствола

Подтвердились положения трудов [3, 6] о соотношении между температурами газов T в начале выстрела и у дульного среза $T_д$. По результатам расчета $T_д = 0{,}6T$ – начальные и конечные точки графика, представленного на рис. 4.

Приемы декомпозиции ОЗВБ позволили однозначно установить и зависимости давления p, скорости v и температуры T газов в функции времени выстрела t. Вследствие явных аналогий во временно́й идентификации параметров выстрела, графики $p(t)$, $v(t)$ и $T(t)$ в настоящей работе опущены.

Максимальной достоверности модели способствовали, по-видимому, отдельные приемы:

– прямого описания теплоотдачи снятием допущения о постоянстве коэффициента θ и его вычислений в зависимости от массива данных таблицы, а также по значениям геометрии $2e_1$ и энергетики $J_к$ пороха, с помощью введенных поправок (4), (5) и (6), соответственно;

– систематизации параметров $K(x)$ и $L(x)$ и целенаправленной комбинации методов Рунге – Кутта при интегрировании системы уравнений (9);

– выбора шага Δτ интегрирования по множеству моментов времени t уравнений внутренней баллистики (9) и вспомогательных зависимостей.

Таким образом, разработанная модель, выраженная системой уравнений (9) с соответствующими компонентами и условиями однозначности ее решений, позволяет с наибольшей точностью, обусловленной раскрытыми допущениями, изучать фактическую природу рабочих процессов выстрела.

Список литературы

1. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962. 703 с.

2. Проектирование ракетных и ствольных систем / под ред. Б.В. Орлова. М.: Машиностроение, 1974. 828 с.

3. Миропольский Ф.П., Морозов А.А., Пырьев Е.В. Баллистика авиационных средств поражения. Ч. 1. Внутренняя баллистика ствольных систем и ракетные двигатели твердого топлива / под ред. Ф.П. Миропольского. М.: Изд-во ВВИА имени проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 255 с.

4. Srinivasan K., Narayanan S., Sharma O. Numerical studies on erosive burning in cylindrical solid propellant grain // Heat Mass Transfer. 2008. V. 44. P. 579 – 585.

5. Семенов И.В., Уткин П.С., Ахмедьянов И.Ф. Применение многопроцессорной вычислительной техники для решения задач внутренней баллистики // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. С. 183 – 193.

6. Пушкарев А.М., Вольф И.Г., Ихтисанов И.И. Исследование теплового состояния стволов оружия и влияния его на начальную скорость снаряда // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 11. С. 26 – 31.

7. Комбинированная математическая модель внутренней и промежуточной баллистики авиационного артиллерийского оружия / А.Б. Бабаджанов, И.А. Подкопаев, А.В. Подкопаев, В.И. Должиков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 4. С. 177 – 185.

8. 30 мм патрон с беспламенным порохом с осколочно-фугасно-зажигательным снарядом и взрывателем АГ-30Д к пушке ГШ-6-30. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1984. 24 с.

9. Одноствольная авиационная пушка 30 мм ГШ-301. Руководство по технической эксплуатации. Ч. 1. Общие сведения о пушке, боеприпасах и звеньях патронной ленты, принцип действия, конструкция и принципиальная электрическая схема пушки. Режимы стрельбы. 9-А-4071К.00.000-01РЭ, 1986, 17 с.

10. Алферов В.В. Конструкция и расчет автоматического оружия. М.: Машиностроение, 1977. 248 с.

Подкопаев Илья Александрович, адъюнкт, ilya.podkopaev.96@bk.ru, Россия, Воронеж, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж),

Подкопаев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доцент, профессор, aleksanpodkopaev@mail.ru, Россия, Воронеж, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж),

Должиков Василий Иванович, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры, Link707@mail.ru, Россия, Воронеж, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж)

DECOMPOSITION MATHEMATICAL MODEL OF A SMALL-CALIBER ARTILLERY SHOT

I.A. Podkopaev, A.V. Podkopaev, V.I. Dolzhikov

A formalization of the physical processes associated with the acceleration of a projectile in a small-caliber artillery barrel is presented, which separates in detail the forms of the initial data, the type of decision rules for the main problem of internal ballistics and their sequence based on the specification of the gas-dynamic parameters of powder gases. Particular blocks of the proposed decompositional mathematical model of internal ballistics are grouped into a compact form, allowing their matching with sequential abstraction of the adiabatic expansion of gases in the barrel. Considerable attention is paid to assessing the accuracy of the model, taking into account the priority of the normalized information contained in the operational documentation for the object of study.

Key words: gas state parameters, gunpowder combustion law, assumption, grouping of parameters, Runge-Kutta method.

Podkopaev Ilya Aleksandrovich, adjunct, ilya.podkopaev.96@bk.ru, Russia, Voronezh, Air Force academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin (Voronezh),

Podkopaev Aleksandr Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, professor, aleksanpodkopaev@mail.ru, Russia, Voronezh, Air Force academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin (Voronezh),

Dolzhikov Vasily Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, head of chair, Link707@mail.ru, Russia, Voronezh, Air Force academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin (Voronezh)

УДК 004.932
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-203-204

СОВМЕЩЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЛАКОВ ТОЧЕК. ИТЕРАТИВНЫЙ АЛГОРИТМ БЛИЖАЙШИХ ТОЧЕК

Т.Н. Крючкова, А.И. Ефимов

В данной статье рассмотрен процесс регистрации облаков точек, в частности алгоритм жесткой регистрации трехмерных облаков. Описана программная реализация итеративного алгоритма совмещения трехмерных облаков точек.

Ключевые слова: 3D-модель, трехмерные облака точек, алгоритм жесткой регистрации, алгоритм итеративной ближайшей точки.

В настоящее время проблема совмещения трехмерных облаков точек является довольно распространенной, так как данные методы широко используются в создании 3D-моделей, что, в свою очередь, применяется в различных сферах человеческой жизни: в кинематографе, медицине, архитектуре, метрологии, компьютерном моделировании и так далее.

Совмещение трехмерных облаков точек обусловлено так называемой регистрацией облаков точек. Схема процесса регистрации представлена на рисунке 1.

Существует большое количество алгоритмов для данной регистрации. Среди них особо выделяются следующие:

1. Алгоритм жесткой регистрации;
2. Алгоритм нежесткой регистрации.

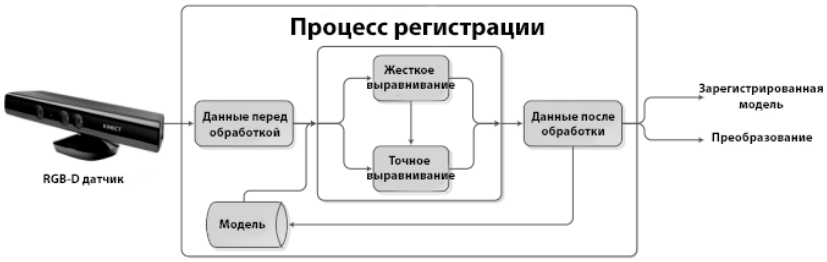


Рис. 1. Процесс регистрации облаков точек

Алгоритм жесткой регистрации построен на использовании жесткого преобразования, отображающего одни точки в другие. Данное преобразование относится к преобразованиям евклидового пространства. Оно сохраняет евклидово расстояние между каждой парой точек, и, таким образом, в ходе правильного преобразования объект должен сохранить свою форму. К жестким преобразованиям относятся сдвиги, повороты, отражения или любая их последовательность. Отражения иногда исключают из определения жесткого преобразования, так как требуется, чтобы преобразование также сохраняло одну сторону объекта в евклидовом пространстве (например, чтобы левая рука внезапно не стала правой рукой и т.д.).

Все жесткие преобразования являются примерами аффинных преобразований. Множество всех жестких преобразований представляет собой математическую группу, так называемую евклидовую группу, обозначаемую *E(n)* для *n*-мерных евклидовых пространств. Множество собственных жестких преобразований называется специальной евклидовой группой, с обозначением *SE(n)*.

Жесткое преобразование формально определяется, как преобразование, которое при воздействии на любой вектор v создает преобразованный вектор *T(v)* (1):

$$T(\upsilon) = R_{\upsilon} + t, \tag{1}$$

где $R^T=R^{-1}$ (т.е. *R* – ортогональное преобразование), а *t* – вектор, дающий перевод начала координат.

Правильное жесткое преобразование имеет, кроме того,

$$\det(R) = 1,$$

что означает, что *R* не создает отражения и, следовательно, представляет собой вращение (ортогональное преобразование с сохранением ориентации).

Пример использования алгоритма жесткой регистрации представлен на рисунке 2.

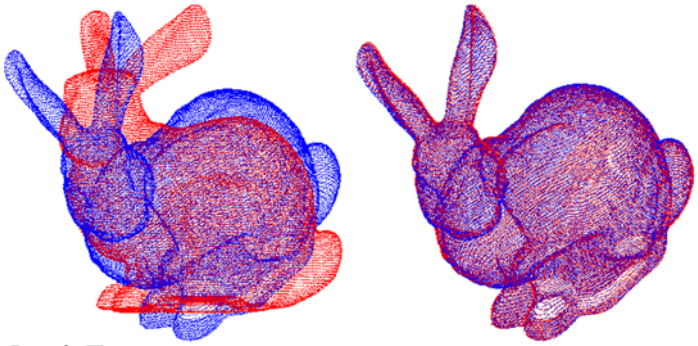


Рис. 2. Пример использования алгоритма жесткой регистрации

В алгоритм жесткой регистрации входит такой метод, как «итеративная ближайшая точка» (ICP - Iterative Closest Point) [1, 2].

Итеративная ближайшая точка – алгоритм, используемый для регистрации облаков точек. ICP часто используется для реконструкции 2D или 3D поверхностей из полученных разрозненных отсканированных изображений, для локализации роботов и достижения оптимального планирования движения (например, когда привод колес ненадежен из-за скользкой местности) и т.д. Его цель состоит в том, чтобы найти такое преобразование, которое минимизирует среднеквадратичное евклидово расстояние между соответствующими точками.

В алгоритме итеративной ближайшей точки (итеративной соответствующей точке) одно облако точек – эталон (цель) – остается фиксированным, в другое – исходное – преобразуется для наилучшего соответствия эталону. Алгоритм итеративно пересматривает преобразование (комбинацию переноса и поворота), необходимое для минимизации метрики ошибки, обычно расстояния от источника до облака опорных точек. ICP – один из широко используемых алгоритмов для совмещения трехмерных моделей с учетом исходного предположения о требуемом жестком преобразовании.

Алгоритм итеративной ближайшей точки отличается от таких алгоритмов, как алгоритм Кабша [3] и других решений ортогональной задачи Прокруста (задачи матричной аппроксимации в линейной алгебре) тем, что алгоритм Кабша требует соответствия между наборами точек в качестве входных данных, а итеративный алгоритм ближайшей точки рассматривает соответствие как переменную, которую необходимо подвергнуть оценке.

Входные данные: эталонное и исходное облака точек (сцена / модель), начальная оценка преобразования для выравнивания источника с эталоном (необязательное условие), критерии остановки итераций (достаточная точность).

Выход: уточненное преобразование.

Шаги алгоритма итеративной ближайшей точки:

1. Для каждой точки (из всего набора вершин, обычно называемого плотным, или выборки пар вершин из каждой модели) в исходном облаке точек сопоставить ближайшую точку в облаке опорных точек (или выбранном наборе);

2. Оценить комбинацию поворота и переноса, используя среднеквадратичный метод минимизации метрики расстояния от точки до точки, который лучше всего выровняет каждую исходную точку с ее сопоставлением, найденным на предыдущем этапе. Данный шаг также может включать взвешивание точек и отбрасывание лишнего до выравнивания;

3. Преобразовать исходные точки, используя полученное преобразование;

4. Повторить шаги (повторно связать точки и т.д.).

Структура метода ICP представлена на рисунке 3.

Рис. 3. Структура метода ICP

Из рисунка 3 можно выделить, что один из наборов данных – модель, другой – сцена. ICP начинает работу с заданного начального преобразования, а затем продолжает итерацию в два последовательных шага. Сначала точки сцены обрабатываются с использованием текущего преобразования. После этого пары соответствий вычисляются с использованием точек сцены и модели. В конце каждой итерации и с использованием информации о паре соответствий вычисляется преобразование, которое наилучшим образом показывает соответствия.

Описание алгоритма ICP. Реализация алгоритма ICP состоит в математическом и дальнейшем программном анализе входных данных и полученной совмещенной трехмерной модели [5].

Для алгоритма регистрации используются следующие представления геометрических данных:

1. наборы точек;
2. наборы линейных сегментов (полилинии);
3. неявные кривые: $\vec{g}(x, y, z) = 0$;
4. параметрические кривые: *(x(u), y(u), z(u))*;
5. наборы треугольников (граненые поверхности);
6. неявные поверхности: *g(x,y,z) = 0*;
7. параметрические поверхности: *(x(u,v), y(u,v), z(u,v))*.

В описании алгоритма фигура «данных» *P* перемещается (регистрируется, позиционируется) так, чтобы наилучшим образом соответствовать фигуре «модели» *X*. Данные и форма модели могут быть представлены в любой из допустимых форм. В данном случае форма данных должна быть разложена на набор точек. Если форма данных не находится в форме набора точек, то действовать надо следующим образом: точки, которые будут использоваться для наборов треугольников и линий, будут являться вершинами и конечными точками соответственно; если форма данных имеет форму поверхности или кривую, то используются вершины и конечные точки приближения «треугольник / линия». Количество точек в форме данных будет обозначено, как N_p.

Пусть N_j – количество точек, отрезков или треугольников, входящих в форму модели. Будет обозначена метрика расстояния *d* между отдельной точкой данных *p* и формой модели *X* (2).

$$d(\vec{p},X)=\min_{\vec{x}\in X}\left\|\vec{x}-\vec{p}\right\| \quad (2)$$

Ближайшая точка в X, которая дает минимальное расстояние $\vec{y}$, обозначается $d(\vec{p},\vec{y})=d(\vec{p},X)$, где $\vec{y}\in X$. Вычисление ближайшей точки – это $O(N_x)$, наихудший случай с ожидаемыми затратами $\log(N_x)$. Когда вычисление ближайшей точки (от $\vec{p}$ до X) выполняется для каждой точки в P, этот процесс является наихудшим случаем $O(N_pN_x)$. Пусть Y обозначает результирующий набор ближайших точек, и пусть C – оператор ближайшей точки (3).

$$Y=C(P,X) \quad (3)$$

Учитывая результирующий соответствующий набор точек Y, регистрация методом наименьших квадратов вычисляется по формуле (4).

$$(\vec{q},d)=Q(P,Y) \quad (4)$$

Далее положения набора точек формы данных обновляются с помощью $P=\vec{q}(P)$.

Формулирование алгоритма ICP. Задан набор точек P с N_p точками $\{\vec{p}_l\}$ из формы данных и формы модели X (с поддерживающими геометрическими примитивами: точками, линиями или треугольниками).

Итерация инициализируется установкой $P_0 = P$, $\vec{q}_0=[1,0,0,0,0,0,0]^t$ и $k=0$. Векторы регистрации определяются относительно исходного набора данных P_0 таким образом, чтобы окончательная регистрация представляла собой полное преобразование. Шаги 1, 2, 3 и 4 применяются до сходимости в пределах допуска τ. Вычислительная стоимость каждой операции указана в скобках [7].

1. Вычисление ближайшей точки: $Y_k=C(P_k,X)$ (вычислительная стоимость: $O(N_pN_x)$ в худшем случае, $O(N_p\log N_x)$ (среднее значение).

2. Вычисление регистрации: $(\vec{q}_k,d_k)=Q(P_0,Y_0)$ (стоимость: $O(N_p)$).

3. Применение регистрации: $P_{k+1}=\vec{q}_k(P_0)$ (стоимость: $O(N_p)$).

4. Завершение итерации, когда изменение среднеквадратичной ошибки будет меньше порога $\tau > 0$, задающего желаемую точность регистрации: $d_k-d_{k+1}<\tau$.

Если требуется безразмерный порог, то можно заменить τ на $\tau\sqrt{tr(\sum x)}$, где квадратный корень из следа ковариации формы модели указывает приблизительный размер формы модели.

Реализация алгоритма итеративной ближайшей точки. Программная реализация по данному алгоритму выполнена на языке Python [8].

Реализация состоит из двух частей: программы *«icp»*, в которой прописаны основные функции, а также входные и выходные переменные, и программы «main», где созданные функции запускаются. Рассмотрим программу *«icp».* Основная функция *IterativeClosestPoint*, принимающая входные данные: исходную точку, конечную точку и τ.

```
def IterativeClosestPoint(source_pts, target_pts, tau=10e-6):
```

Перед циклом итераций вводим изначальный номер итерации, равным нулю; текущую току, которой присваиваем значение исходной точки; значение среднеквадратичной ошибки, равной нулю; вектор перевода и матрицу вращения.

```
k = 0 #номер итерации
current_pts = source_pts.copy() #текущая точка
last_rmse = 0 #среднеквадратичная ошибка
t = np.zeros((3, 1)) #вектор перевода
R = np.eye(3, 3) #матрица вращения
```

Затем начинается цикл итераций, состоящий из четырех шагов, описанных выше: вычисление ближайшей соседней точки, вычисление и применение регистрации, вычисление нового значения среднеквадратичной ошибки.

```
while True:
    neigh_pts = FindNeighborPoints(current_pts, target_pts) #вычисление ближайшей соседней точки
    (R, t) = RegisterPoints(source_pts, neigh_pts) #вычисление регистрации
    current_pts = ApplyTransformation(source_pts, R, t) #применение регистрации
    rmse = ComputeRMSE(current_pts, neigh_pts) #вычисление новой среднеквадратичной ошибки
```

Далее ставим условие на окончание итерации: если изменение среднеквадратичной ошибки будет меньше порога $\tau > 0$. После обновляем значения номера итерации и значение среднеквадратичной ошибки.

```
if np.abs(rmse - last_rmse) < tau: #условие завершения итерации
        break
    last_rmse = rmse #присвоение нового значения ошибки
    k = k + 1 #счетчик итераций
  return (R, t, k)
```

После описания алгоритма ICP идет описание функций, участвующих в работе данного алгоритма. Разберем их:

1. Поиск и вычисление ближайшей соседней точки (на основе KD дерева (KD дерево – структура данных с разделением пространства для организации точек в k-мерном пространстве)):

```
# функция для поиска исходных точек соседей в цели
# на основе дерева KD
def FindNeighborPoints(source, target):
  n = source.shape[1]
```

```
    kdt = KDTree(target.T, leaf_size=30, metric='euclidean')
    index = kdt.query(source.T, k=1, return_distance=False).reshape((n,))
    return target[:, index]
```

2. Регистрация облака точек между точками *p1* и *p2*:

```
# регистрация облака точек между точками p1 и p2
# с функцией соответствия 1-1
def RegisterPoints(p1, p2):
    u1 = np.mean(p1, axis=1).reshape((3, 1))
    u2 = np.mean(p2, axis=1).reshape((3, 1))
    pp1 = p1 – u1
    pp2 = p2 – u2
    W = np.dot(pp1, pp2.T)
    U, _, Vh = np.linalg.svd(W)
    R = np.dot(U, Vh).T
    if np.linalg.det® < 0:
        Vh[2, :] *= -1
        R = np.dot(U, Vh).T
    t = u2 – np.dot(R, u1)
    return (R, t)
```

3. Применение регистрации (преобразования) и обратного преобразования:

```
# применение преобразования R, t к pts
def ApplyTransformation(pts, R, t):
    return np.dot(R, pts) + t
# применение обратного преобразования R, t к pts
def ApplyInvTransformation(pts, R, t):
    return np.dot(R.T,  pts – t)
```

4. Вычисление среднеквадратичной ошибки между двумя наборами данных *p1* и *p2*:

```
# Вычисление среднеквадратичной ошибки между двумя наборами данных
# Берется не среднее значение, а сумма
def ComputeRMSE(p1, p2):
    return np.sum(np.sqrt(np.sum((p1-p2)**2, axis=0)))
```

5. Вычисление ошибки:

```
# вычисление ошибки
def CalcTransErrors(R1, t1, R2, t2):
    Re = np.sum(np.abs(R1-R2))
    te = np.sum(np.abs(t1-t2))
    return (Re, te)
```

Теперь рассмотрим программу *«main»*.

В начале программы указываем библиотеки и то, что все функции, которые будут участвовать в работе, берем из файла *«icp»: from icp import **.

Указываем количество точек и откуда мы их будем брать.

```
# количество случайных точек
N = 100
X = np.random.rand(3,N) * 100.0
# использование случайных точек
X = np.loadtxt("data/bunny.txt")
#X = PlyData.read("data/android.ply")
X = X[::50,0:3].T
N = X.shape[1]
```

Набор точек bunny.txt представлен на рисунке 4.

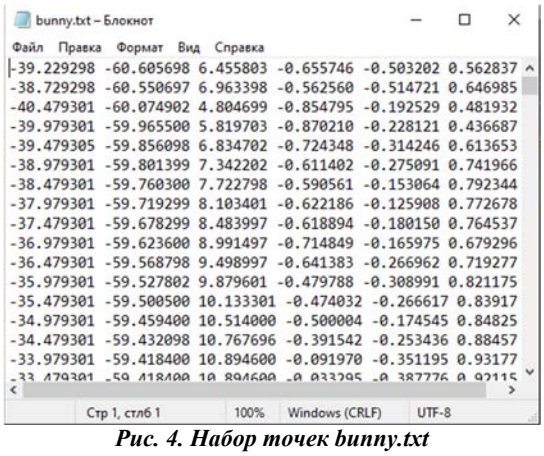


Рис. 4. Набор точек bunny.txt

Указываем произвольный поворот и перевод по осям x, y, z:

```
# произвольные поворот и перевод
```

```
t = np.random.rand(3,1) * 25.0
theta = np.random.rand() * 20
phi = np.random.rand() * 20
psi = np.random.rand() * 20
R = Rot.from_euler('zyx', [theta, phi, psi], degrees = True)
R = R.as_matrix()
```

Выбираем подмножества процентов точек для вычислений:

```
# выбор подмножества процентов точек
subset_percent = 40
Ns = int(N * (subset_percent/100.0))
index = random.sample(list(np.arange(N)), Ns)
P = X[:, index]
```

Вызываем функцию для применения обратное преобразование:

```
P = ApplyInvTransformation(P, R, t)
```

Вызываем функцию для работы ICP алгоритма:

```
# ICP алгоритм
start = time.time()
Rr, tr, num_iter = IterativeClosestPoint(source_pts = P, target_pts = X, tau = 10e-6)
end = time.time()
```

Выводим информацию о затраченном времени на работу алгоритма и количество итераций в консоль:

```
print("Time taken for ICP : {}".format(end - start))
print("num_iterations: {}".format(num_iter))
```

Вызываем функцию для вычисления ошибки и вывод ее значения в консоль:

```
# вычисление ошибки:
Re, te = CalcTransErrors(R, t, Rr, tr)
print("Rotational Error : {}".format(Re))
print("Translational Error : {}".format(te))
```

Вызываем функцию для применения преобразования новых полученных точек:

```
# преобразование новых точек
Np = ApplyTransformation(P, Rr, tr)
```

Делаем визуальный вывод:

```
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
ax.scatter(X[0,:], X[1,:], X[2,:], marker='o', alpha = 0.2, label="input target points")
ax.scatter(P[0,:], P[1,:], P[2,:], marker='^', label="input source points")
ax.scatter(Np[0,:], Np[1,:], Np[2,:], marker='x', label="transformed source points")
ax.set_xlabel('X Label')
ax.set_ylabel('Y Label')
ax.set_zlabel('Z Label')
ax.legend()
plt.show()
```

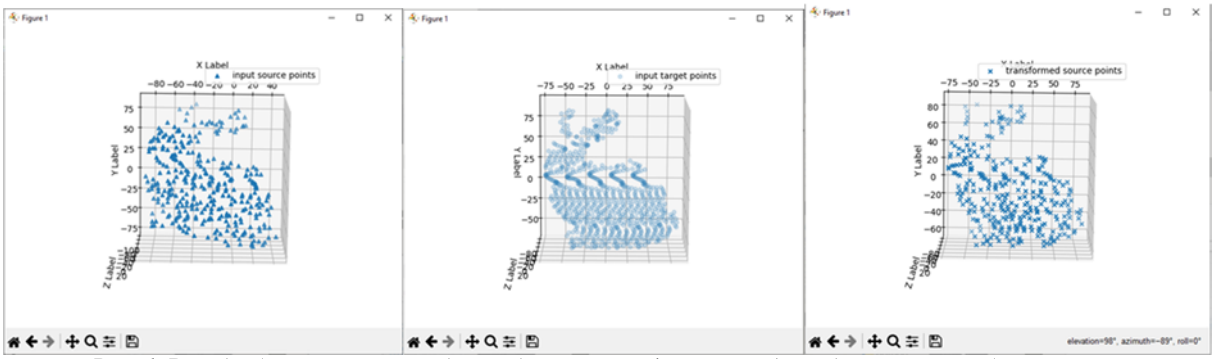


Рис. 6. Вывод облаков точек: входное облако точек (источника); входное целевое облако точек; трансформированное облако точек (источника)

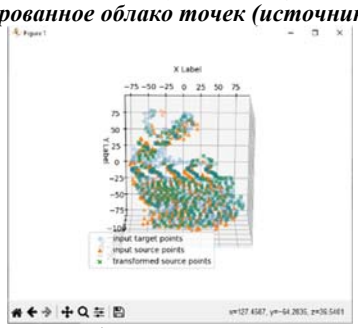


Рис. 7. Полученное изображение совмещенных облаков точек

Информация о работе ICP-алгоритма выводится в консоль после запуска работы алгоритма и содержит в себе данные о: времени работы алгоритма ICP (Time taken for ICP); количестве итераций (num_iterations); ошибке вращения (Rotational Error); ошибке перемещения (Translational Error).

Вывод облаков точек представлен на рис.6. Полученное изображение совмещенных облаков точек представлено на рисунке 7.

Заключение. Рассмотренный в статье способ совмещения облаков точек на основе алгоритма ICP является достаточно надежным и дающим устойчивые результаты вне зависимости от качества совмещаемых облаков. Основная проблема данного метода – совмещение облаков, обладающих лишь частичным перекрытием. В качестве способа устранения данного недостатка в последующих работах предполагается использование алгоритма установления однозначного соответствия между отдельными точками, грубое совмещение облаков по ним, а затем – досовмещение с применением модифицированной версии ICP.

Список литературы

1. Point-set registration [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Point-set_registration. (дата обращения: 08.12.2022).

2. Iterative closest point [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Iterative_closest_point. (дата обращения: 01.12.2022).

3. Kabsch W. A solution for the best rotation to relate two sets of vectors, Acta Crystallographic a Section A, vol. 32, no. 5, 1976. P. 922-923.

4. Vicente Morell-Gimenez, Marcelo Saval-Calvo, Jorge Azorin-Lopez, Jose Garcia-Rodriguez, Miguel Cazorla, Sergio Orts-Escolano and Andres Fuster-GuilloA Comparative Study of Registration Methods for RGB-D Video of Static Scenes// Sensors. 2014, 14, 8547-8576. DOI: 10.3390/s140508547.

5. L. Maier-Hein, T. R. dos Santos, A. M. Franz, H.-P. Meinzer. Iterative Closest Point Algorithm in the Presence of Anisotropic Noise// German Cancer Research Center, Div. of Medical and Biological Informatics. [Электронный ресурс]. URL: https://ceur-ws.org/Vol-574/bvm2010_47.pdf. (дата обращения: 12.12.2022).

6. Vladislav Golyanik, Bertram Taetz and Didier Stricker. Joint pre-alignment and robust rigid point set registration// University of Kaiserslautern, Germany. German Research Center for Artificial Intelligence (DFKI), Germany. 2016. DOI: 10.1109/ICIP.2016.7533212.

7. Paul J. Besl, Neil D. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes// EEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, IEEE Computer Society, 1992.

8. Iterative Closest Point (ICP) Algorithm in Python. [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/iitaakash/icp_python (дата обращения: 21.04.2023).

Крючкова Татьяна Николаевна, магистрант, kriuchkovatatiana2000@mail.ru, Россия, Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,

Ефимов Алексей Игоревич, канд. техн. наук, доцент, lexie62rus@mail.ru, Россия, Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина

POINT-CLOUD SUPERIMPOSITION. ITERATIVE CLOSEST POINT ALGORITHM

T.N. Kriuchkova, A.I. Efimov

This article discusses the process of registering point clouds, in particular, the algorithm of rigid registration of three-dimensional clouds. A software implementation of an iterative algorithm for combining three-dimensional point clouds is described.

Key words: 3D model, three-dimensional point clouds, rigid registration algorithm, iterative nearest point algorithm.

Kriuchkova Tatiana Nikolaevna, master, kriuchkovatatiana2000@mail.ru, Russia, Ryazan, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,

Efimov Aleksey Igorevich, candidate of technical sciences, docent, lexie62rus@mail.ru, Russia, Ryazan, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin

УДК 004.056.53
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-210-211

СИНТЕЗ ШИРОКОПОЛОСНОГО БАЗОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ С КОМБИНИРОВАННЫМИ НАГРУЗКАМИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ

В.А. Мешалкин, В.М. Игнатьев

В статье рассматриваются вопросы построения в единой электродинамической системе широкополосных антенн с комбинированными нагрузками, размещаемых на подвижных объектах. В качестве основного инструмента исследования характеристик направленности антенн на подвижных объектах выбран численный метод электродинамики конечных разностей во временной области.

Ключевые слова: базовый излучатель, численный метод электродинамики конечных разностей во временной области.

Исследование вопросов создания антенного комплекса сопряжено с решением ряда технических задач по достижению малых габаритов, простоты и прочности конструкции антенн, их высокой мобильности, широкополосности и эффективности. Сложность отмеченных задач определяется специфическими условиями эксплуатации антенн, а их решение нуждается в особом подходе при выработке требований к параметрам, оценке эффективности и учету специфики работы объекта с комплектом антенн.

Анализ значительного числа источников, содержащих результаты экспериментальных и аналитических исследований, а также численных расчетов, показывают перспективность применения различного типа нагрузок, сочетания которых исследованы при расчете тонких проволочных антенн. Проволочная аппроксимация линейных антенн с нагрузками в присутствии наземного подвижного объекта и проводимый расчет дает возможность решать задачу синтеза широкополосного базового излучателя с комбинированными нагрузками в рамках существенных допущений и ограничений. Более точное решение можно получить, если приблизить используемую расчетную модель к реальному объекту, рассматривая антенну и объект, как единую электродинамическую систему.

Такой подход обеспечивает более достоверный прогноз исследуемых характеристик. Кроме того, при этом возникает уникальная возможность использовать электродинамические свойства самого объекта. Решение подобных задач возможно на основе метода конечных разностей во временной области (КРВО), реализованного в программной среде CST STUDIO SUITE.

Основная часть. Как известно, согласование в широком диапазоне частот достигается разделением диапазона на частотные полосы, для каждой из которых определяется свой типоразмер антенны. Например, для работы в диапазоне от 30 до 120 МГц применяются три штыревые антенны с длинами 1.2, 1.5 и 2 м.

С целью перекрытия диапазона 30 – 120 МГц одной антенной проведены исследования, которые позволили разработать типоразмер широкополосной штыревой антенны. В ходе исследований в полотно антенны включались емкостные (Рис. 2а), индуктивные (Рис. 2б), комбинированные нагрузки (Рис. 2в), позволяющие влиять на её характеристики. При этом, выбор количества нагрузок, их комбинаций, мест включения и номиналов, был обусловлен необходимостью повышения широкополосности антенны, которая контролировалась в нижней части диапазона рабочих частот по входу, т.е. обеспечивалось требуемое согласование, а в верхней части – развалом амплитудной характеристики направленности.

Результаты моделирования представлены на рисунках 2, 5 (емкостные нагрузки, индуктивные нагрузки, комбинированные нагрузки).

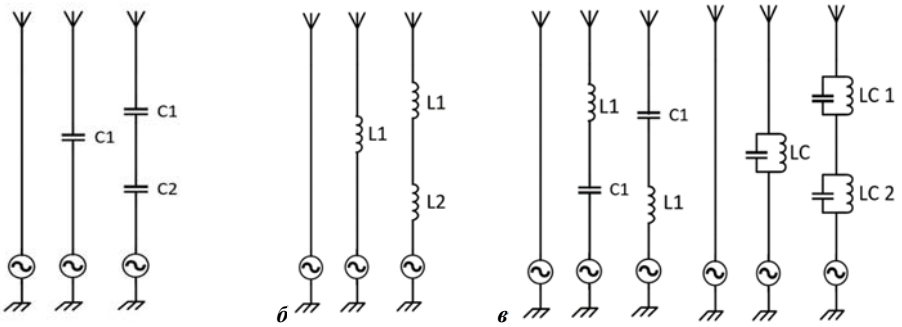


Рис. 1. Антенны с нагрузками: а – емкостными; б – индуктивными; в – комбинированными

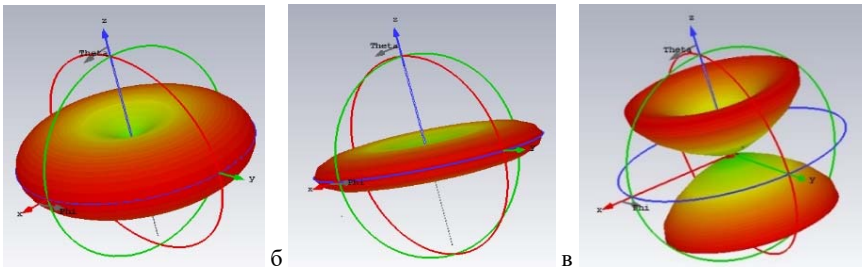


Рис. 2. Трехмерные диаграммы направленности антенны с емкостными нагрузками на частотах: а – 30 МГц; б – 90 МГц; в – 120 МГц

Проведенные исследования подтвердили преимущество антенн с комбинированными резонансными нагрузками по расширению полосы согласования в диапазоне частот и получению максимального значения КБВ на фиксированных частотах.

По результатам исследования предложена широкополосная антенна (Рис. 3), которая рекомендуется к применению на подвижных объектах. Она обеспечивает мгновенную ширину полосы пропускания 65 МГц с относительно низким КСВ и приемлемым коэффициентом усиления.

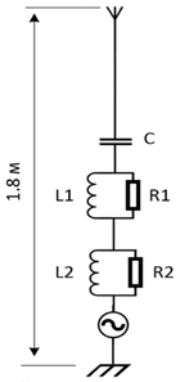
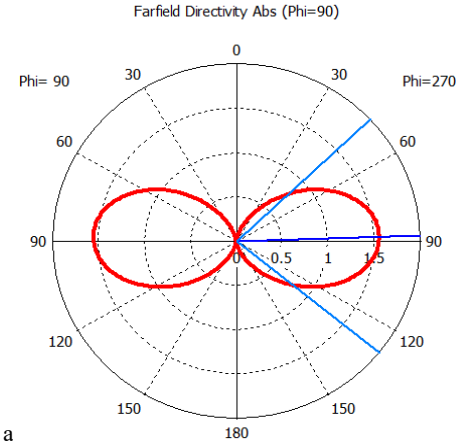


Рис. 3. Схема широкополосной антенны с комбинированными нагрузками

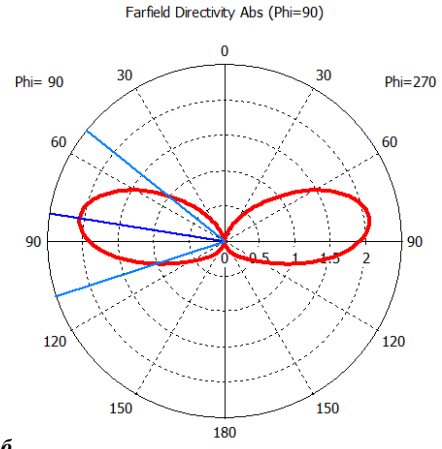
Здесь: $L_1 = 0{,}57\mu$Гн, $Q = 92$, при 30 МГц, $R_1 = 150$ Ом; $L_2 = 0{,}39\mu$Гн, $Q = 93$, при 30 МГц,; $R_2 = 250$ Ом, С = 34 пФ.

При включении в антенну ряда индуктивно-резистивных нагрузок будет изменяться ее электрическая длина. Это позволяет использовать её для обеспечения связи в диапазоне 30 – 108 МГц без настройки.

Результаты расчетов КСВ в диапазоне частот для антенны без нагрузок (I) и с комбинированными нагрузками (II) приведены на рисунке 5, при этом направленные свойства в рабочем диапазоне частот практически сохраняются (рисунок 4).



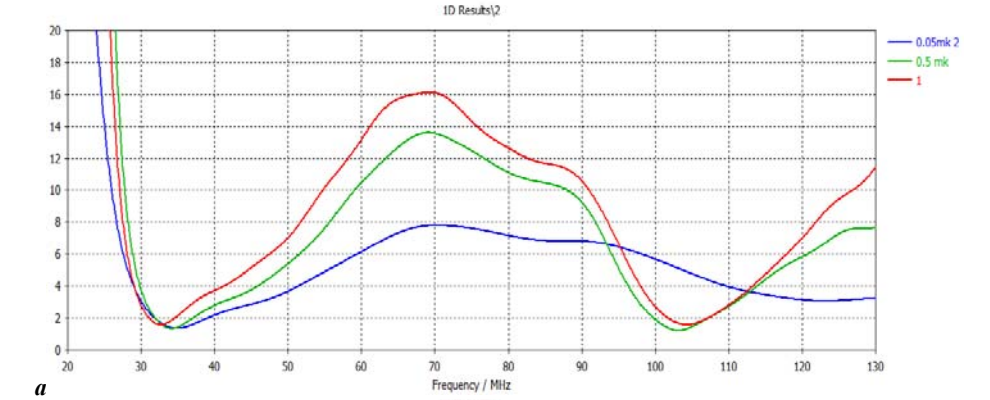
а



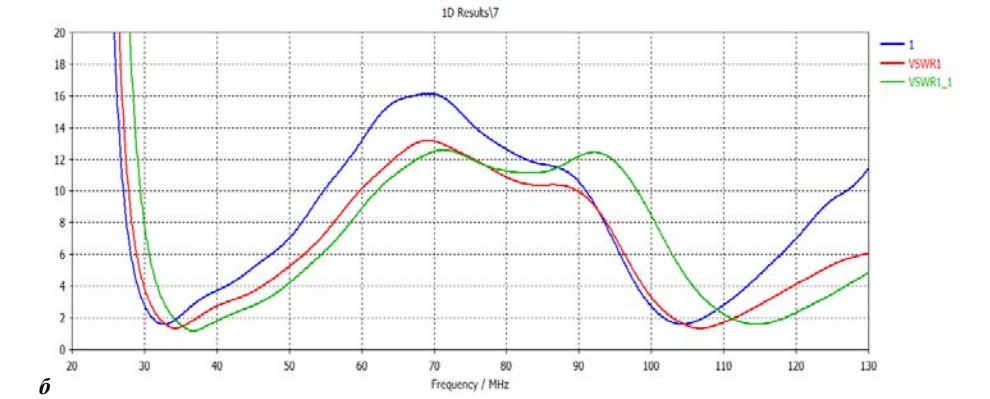
б

Рис. 4. Диаграммы направленности антенны с комбинированными нагрузками на частотах: а – 30 МГц; б – 108 МГц

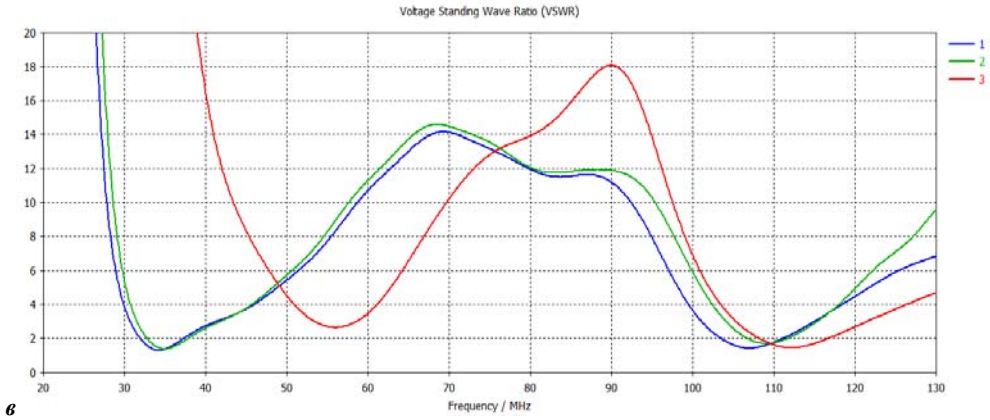
Зависимости изменения КСВ от частоты представлены на рис. 5.



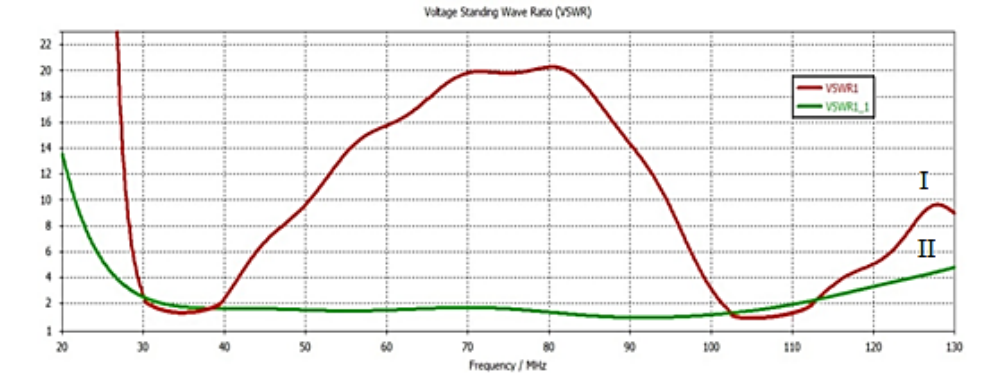
а



б



в



г

Рис. 5. Зависимость изменения КСВ от частоты: а – емкокстные нагрузки; б – индуктивные нагрузки; в – комбинированные нагрузки; г – широкополосная антенна

Заключение. Преимуществом достаточно простых в изготовлении антенн с комбинированными нагрузками является их низкая стоимость, малые массогабаритные показатели, которые во многом предопределяют варианты размещения антенны на наземном подвижном объекте.

Применение данной широкополосной антенны исключает необходимость настроек и значительно увеличивает возможности радиоэлектронных средств по широкому внедрению перспективных режимов работы (ШПС) в линиях радиосвязи, что способствует повышению их помехоустойчивости.

Список литературы

1. Денискин С.В., Савицкий О.К. Расчет напряженности электромагнитного поля в замкнутом объеме методом конечных разностей во временной области для разработки методики рационального размещения технических средств в подвижном объекте // Информация и космос. № 1, 2009. С. 5–9.

2. S. Yee. «Numerical solution of initial boundary value problems involving Max-well`s equations in isotropic in isotropic media» IEEE Trans. Antenna`s Propagat. May 1966. Vol. AP-14. P. 302-307.

3. А. Зеленин. Вычисление электромагнитного поля в дальней зоне с использованием метода FDTD и интеграла Кирхгофа. [Электронный ресурс]. URL: www.zfdtd.narod.ru (дата обращения: 10.05.2023).

4. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. М.: Физматлит, 2013. 432 с.

5. Berenger J.P. Perfectly Matched Layer (PML) for Computational Electromagnetics. Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics. Morgan & Claypool, France, 2007. 117 p.

Мешалкин Валентин Андреевич, старший научный сотрудник, slava.ign85@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Научно-исследовательский центр Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Игнатьев Вячеслав Михайлович, старший научный сотрудник, Россия, Санкт-Петербург, Научно-исследовательский центр Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

SYNTHESIS OF A BROADBAND BASE EMITTER WITH COMBINED APPLICATIONS OF THE FINITE DIFFERENCE METHOD

V.A. Meshalkin, V.A. Parfirov, V.M. Ignatiev

The article discusses the issues of constructing broadband antennas with combined loads, placed on moving objects, in a unified electrodynamic system. The numerical method of finite difference electrodynamics in the time domain was chosen as the main tool for studying the directivity characteristics of antennas on moving objects.

Key words: basic emitter, numerical method of finite difference electrodynamics in the time domain.

Meshalkin Valentin Andreevich, senior researcher, slava.ign85@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Scientific Research Center of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Ignatiev Vyacheslav Mikhailovich, senior researcher, Russia, St. Petersburg, Scientific Research Center of the Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

УДК 004.921
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-213-214

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕРНИСТСКИХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБУЧЕНИИ КУРСАНТОВ АВТОШКОЛЫ

С.И. Цехош, Б.В. Журавский

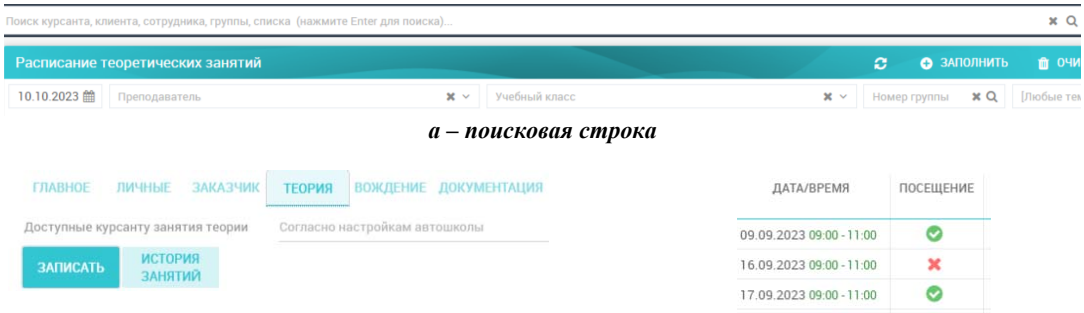
В современном мире невозможно представить работу без применения информационных и компьютерных технологий. Учебный и управленческий процесс в автошколах не стал исключением. Для данной работы применяется информационный сервис «Автошкола-Контроль», электронные ресурсы, мультимедийные презентации с реальными дорожными ситуациями, что позволяет преподавателю более наглядно проиллюстрировать материал и погрузить курсанта в реальные дорожные условия, не подвергая его опасности и подготовить его психологически к реальным дорожным ситуациям. В статье приведены данные технологии, которые имеют ряд достоинств, но имеют и недостатки. Приведены рекомендации как устранить недостатки и повысить качество работы при подготовке курсантов автошколы.

Ключевые слова: сервис Автошкола-Контроль, компьютерные технологии, дорожная ситуация, дорожные знаки.

Введение. Информационный сервис «Автошкола-Контроль» позволяет упростить управленческую работу и работу преподавателей автошкол. Данный сервис позволяет хранить большой объем информации и обрабатывать её. На рисунке 1 показана функция, которая позволяет провести анализ посещаемости курсантов. Для этого необходимо выбрать конкретного курсанта (рисунок 1 – а) затем перейти в раздел «теория» и выбрать подраздел «история занятий» (рисунок 1 – б). Система отразит дату, время и посещаемость (рисунок 1 – в).

Данная функция позволяет руководящему составу определять величину оплаты преподавателю за конкретное количество курсантов и проследить статистку их посещаемости, выявить проблему спада посещаемости. Преподавателю данная статистика позволяет проследить в дальнейшем результат сдачи контрольных точек. При анализе данных выявлено, что зачастую курсанты допускают ошибки в тех темах, которые проходили самостоятельно и пропустили очное занятие.

Рекомендации из собственного опыта авторов – необходимо обязательное пояснение материала тем курсантам, которые пропустили занятие до начала занятия или отправка им учебного материала с подробными пояснениями.



а – поисковая строка

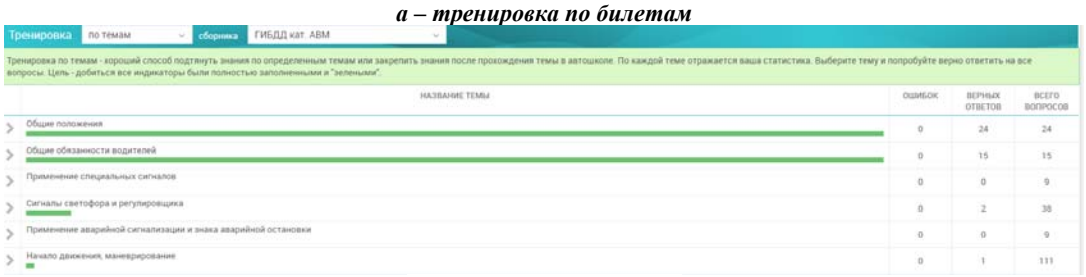
б – интерфейс ***в – окна мониторинга посещаемости***

Рис. 1. Информационный сервис «Автошкола-Контроль»

Целью создания моделей дорожных ситуаций является повышение доступности информации в результате большей наглядности, так как человек плохо воспринимает информацию если она представлена сплошным текстом и не сопровождается наглядным материалом в виде иллюстрации, анимации, примеров из реальной жизни [1,8,9].

После изучения теории курсантам предлагается закреплять свои знания при помощи тестирования и здесь у них возникают ошибки в случае обучения с использованием дистанционной формы обучения [5] или в случае, если курсанты пропускали очные теоретические занятия. После каждой пройденной темы необходимо закреплять полученные знания [2]. Проверку полученных знаний надо проходить поэтапно и выбирать тренировку не по билетам (рисунок 2 – а), а по темам (рисунок 2 – б).

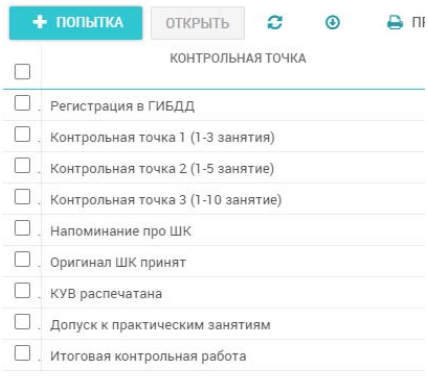
а – тренировка по билетам



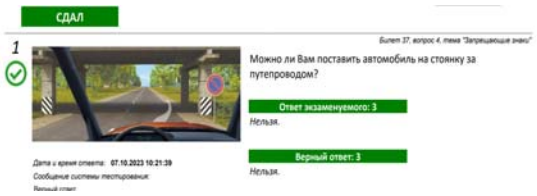
б – тренировка по темам

Рис. 2. Перечни билетов и тем для тренировки

Рекомендации авторов - при прохождении тестирования по темам и билетам необходимо настраивать тестирование для курсантов через программу по контрольным точкам (рисунок 3 – а), так как при выполнении данной работы появляется надпись «СДАЛ» (рисунок 3 – б) или «НЕ СДАЛ» (рисунок 3 – в), что повышает мотивацию курсантов. Также преподаватель может настроить через сервис конкретные темы в контрольных точках.



а – виды контрольных точек



б – положительный результат

в – отрицательный результат

Рис. 3. Контрольные точки и их результаты

В сервисе «Автошкола-Контроль» имеется недостаток - при выборе тем не отражается отдельно вариант изменения с датой правок в ПДД [4], данные правки вносятся сразу в темы и билеты, что не всегда удобно.

Если курсант уже прошел курс теории и готовится к сдаче в ГИБДД, то он, может быть, не осведомлен о данных изменениях, так как может это обнаружить только при прохождении тестирования по темам или билетам, а может и не встретить информацию о данных изменениях. Рекомендации авторов - показать вариант дополнительных сервисов, где присутствует данный раздел или постоянно мониторить изменения в ПДД, но только с помощью официальных источников, например, на «Сайте ГИБДД» (рисунок 4). Необходимо пояснить курсантам, что данные изменения надо постоянно отслеживать, особенно после получения водительского удостоверения, так как изменения в ПДД вносятся не просто так, они влияют на безопасность водителя и всех участников дорожного движения [3,10].

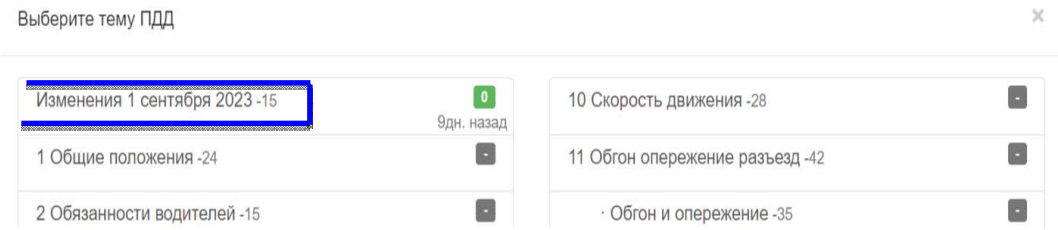


Рис.4. Информация о изменениях в ПДД на сайте ГИБДД

Основная часть. В дистанционной форме обучения имеются недостатки, к пояснению ответа идет только текст, который курсант не всегда воспринимает (рисунок 5).

Рис. 5. Экзаменационный билет

Сложность для курсанта при прочтение экзаменационного билета (рисунок 5) в том, что они забывают действие знаков или вообще не представляют траектории движения автомобилей на данном перекрестке, если при решении билета есть возможность подумать в течение минуты, то в реальной ситуации нет даже лишних секунд, не говоря про минуты [2,6,7]. Водитель до момента, как подъедет к перекрестку, должен прочитать знаки, принять решение, куда будет двигаться, и занять нужную полосу движения и это все за очень маленький промежуток времени [2,6,7].

Для решения данных затруднений авторами применялась компьютерная графика, которая выполнена в программе КОМАС-3D, для воссоздания дорожной ситуации на перекрестке. На рисунке 6 и в таблицах 1,2 представлены примеры разработки авторов статьи. За счёт компьютерной графики авторы показали траектории движения каждого автомобиля, дорожный знак «Въезд запрещен», который обрезан на иллюстрации билета, который несет большую информативность для водителя на красном автомобиле и запрещает ему прямолинейную траекторию. Для представления полной картины перекрёстка изображен на виде сверху.

На рисунке 6 представлен смоделированный перекресток со всеми установленными по правилам знаками и полным пояснением, что позволяет начинающему водителю лучше понять дорожную ситуацию и применить полученные теоретические знания на практическом вождении.

Для теоретического занятия по теме «Дорожные знаки» моделируется отдельная дорожная ситуация и показываются зоны действия знаков. В таблицах 1,2 приведены примеры дорожных ситуаций из билетов с дополнительными пояснениями к каждой ситуации, полученными при помощи компьютерной графики.

Заключение. Модернистские компьютерные технологии позволяют ежедневно улучшать управленческий и учебный процесс работы, что повышает качество обучения курсантов. Преподаватель автошколы постоянно развивается и совершенствует свой подход к учебному процессу, разрабатывает новые методы и методики обучения, в том числе и с использованием информационных технологий.

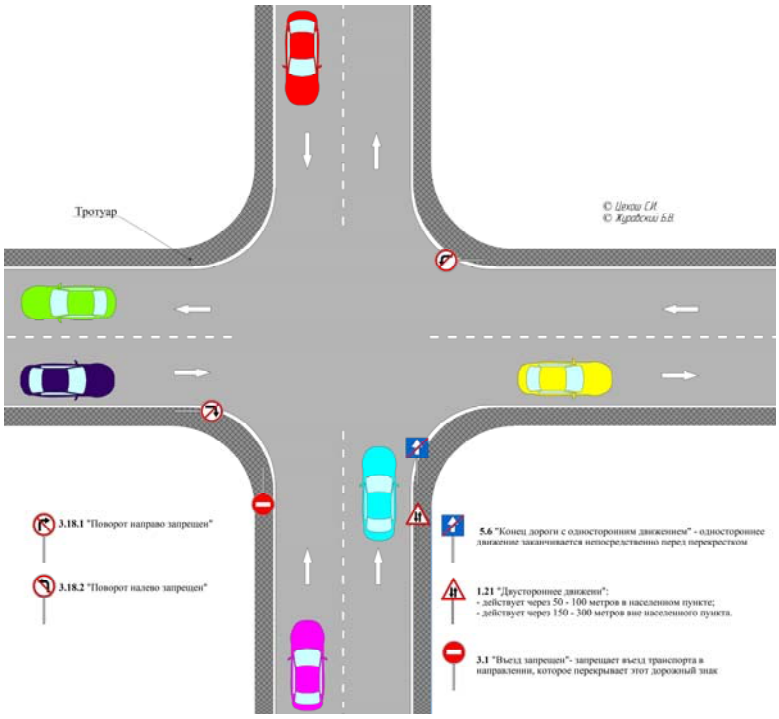


Рис. 6. Двухмерное моделирование дорожной ситуации

Таблица 1

Компьютерная графика дорожных ситуаций

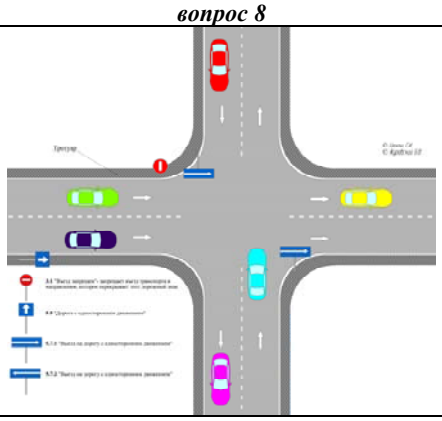
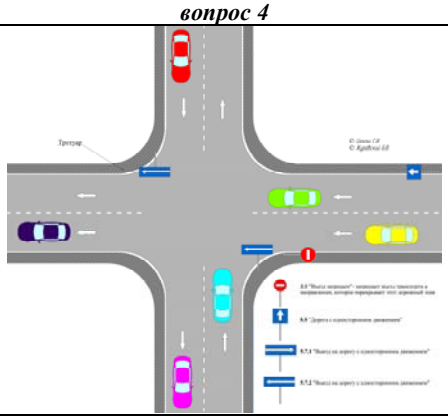
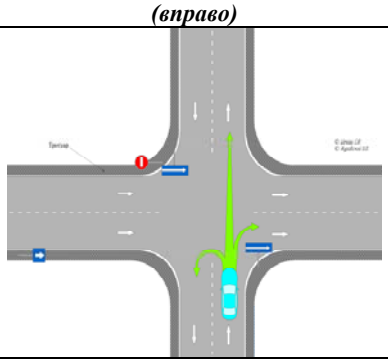
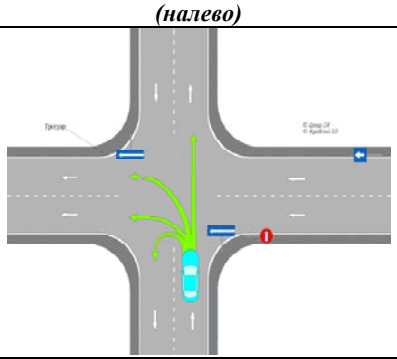
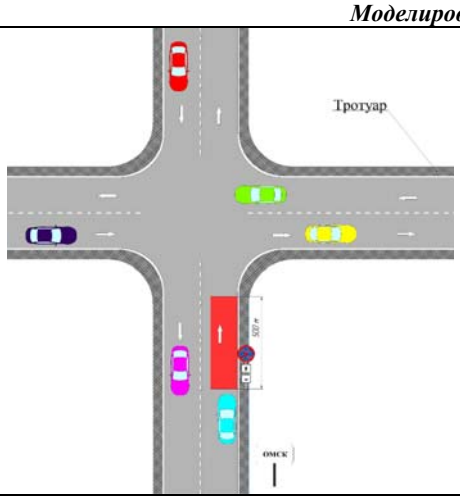
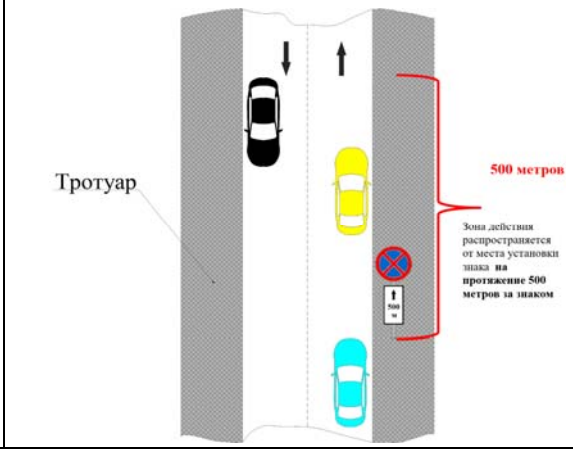
1 – Илюстрация эзаменационного билета № 18 вопрос 8	***2 – Илюстрация эзаменационного билета № 32 вопрос 4***
	
3 – выезд на дорогу с одностроним движением (вправо)	***4 – выезд на дорогу с одностроним движением (налево)***
	
5 – правильные траектории движения автомобиля согласно знака 5.7.1	***6 – правильные траектории движения автомобиля согласно знака 5.7.2***

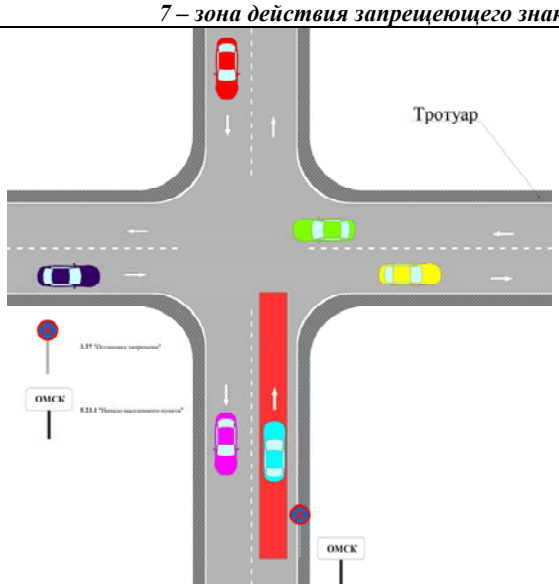
Таблица 2

Моделирование дорожных ситуаций

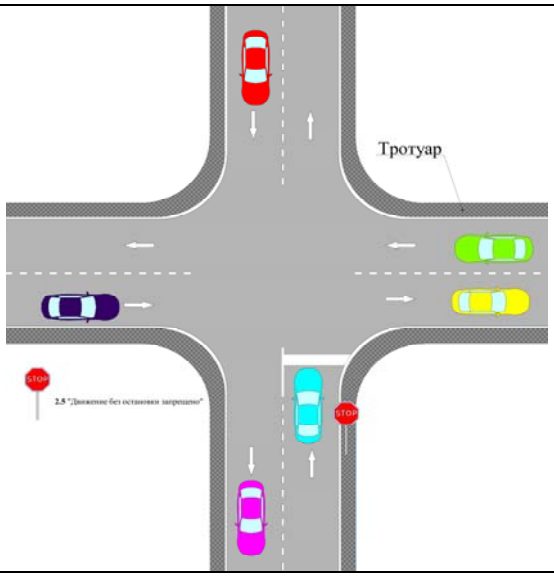




7 – зона действия запрещеющего знака 3.27 с дополнительной табличкой 8.2.2



8 – зона действия запрещеющего знака 3.27



9 – место остановки автомобиля при наличие знака 2.5

Применение модернистских компьютерных технологий позволяет смоделировать разноплановые дорожные ситуации, что помогает подготовить курсанта теоретически к практическому вождению.

Курсанты во время практического вождения быстрее принимают правильные решения в сложных дорожных ситуациях, курсанты понимают, как правильно действовать, чтобы не попасть в ДТП [10].

Список литературы

1. Винокуров, В. Н. Опыт применения информационных технологий для обучения курсантов автошкол / В. Н. Винокуров // Проблемы науки: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 150-летию Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева и 60-летию Новомосковского института РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковск, 25–26 ноября 2019 года. Том Часть 2. Новомосковск: Новомосковский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева", 2019. С. 205-208.

2. Гарифуллина, Л. Г. Качество подготовки водителей как фактор повышения безопасности дорожного движения / Л. Г. Гарифуллина, Н. З. Сафиуллин // Инновационная наука. 2016. № 4-1. С. 93-96. EDN VSUKYB.

3. Корнеенко Т.О. Профессиональная компетентность преподавателей и мастеров автошкол как один из факторов, снижающих дорожно-транспортную аварийность // Современная наука. 2022. № 4. С. 80-83.

4. Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 N 1090 (ред. от 24.10.2022) "О Правилах дорожного движения".

5. Приказ Минобрнауки России от 23.08.2017 N 816 "Об утверждении Порядка применения организациями, осуществляющими образовательную деятельность, электронного обучения, дистанционных образовательных технологий при реализации образовательных программ" (Зарегистрировано в Минюсте России 18.09.2017 N 48226).

6. Программа формирования навыков безопасного управления автомобилем курсантов автошколы в процессе обучения / М.А. Реньш, Б.А. Сидоров, О.С. Гасилова [и др.]. 2020. Т. 10, № 6-1. С. 280-287. DOI: 10.34670/AR.2020.21.57.037. EDN ZWQQZO.

7. Тишин Б.М. Т47 Автотехническая экспертиза: справочно-методическое пособие по производству судебных экспертиз. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 252 с.

8. Филатова О.Н. Педагогические и информационно-коммуникационные технологии при обучении в автошколе // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". 2008. № 6-2(31). С. 143-145.

9. Цехош С.И. Применение графического метода в процессе профессиональной подготовки будущих инженеров / С.И. Цехош, Б.В. Журавский // Известия Тульского государственного университета. Педагогика. 2023. Вып. 3. С. 62-68. EDN YNVNZC.

10. Шурухина К.В. Повышение качества обучения в автошколах как условие обеспечения безопасности дорожного движения / К. В. Шурухина, А. В. Каргина // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: сборник статей XIII Международной научно- практической конференции, Пенза, 15–16 ноября 2019 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2019. С. 242-246.

Цехош София Ивановна, канд. техн. наук, доцент, sofia.tsehosh@yandex.ru, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,

Журавский Борис Викторович, старший преподаватель, ra9meo@mail.ru, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

THE USE OF MODERNIST COMPUTER TECHNOLOGIES IN THE TRAINING OF DRIVING SCHOOL CADETS

S.I. Tsekhosh, B.V. Zhuravsky

In the modern world, it is impossible to imagine work without the use of information and computer technologies. The educational and management process in driving schools was no exception. For this work, the information service "Driving School-Control", electronic resources, multimedia presentations with real road situations are used, which allows the teacher to more clearly illustrate the material and immerse the cadet in real road conditions without exposing him to danger and prepare him psychologically for real road situations. The article presents these technologies, which have a number of advantages, but also have disadvantages. Recommendations are given on how to eliminate shortcomings and improve the quality of work in the training of driving school cadets.

Key words: driving school service-control, computer technology, traffic situation, road signs.

Tsekhosh Sofia Ivanovna, candidate of technical sciences, docent, sofia.tsehosh@yandex.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile and Road University,

Zhuravsky Boris Viktorovich, senior lecturer, ra9meo@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile and Road University

УДК 519.718
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-218-219

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМА ВВОДИМОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ

А.А. Лучко, Р.В. Фадеев, И.О. Повчун, Н.В. Шкилев, П.А. Новиков, С.А. Диченко, Д.В. Самойленко

Анализ известных способов обеспечения целостности данных показал, что в условиях непрерывного роста объема и ценности информации, обрабатываемой и хранящейся в автоматизированных системах различного назначения, главным недостатком является высокая избыточность контрольной информации, приводящей к преждевременному расходованию ограниченного ресурса рассматриваемых систем. Рассмотрен способ обеспечения целостности данных на основе теоретико-числовых преобразований в комплексной плоскости и представлены результаты его исследований, связанные с возможностью сокращения объема вводимой избыточности при его применении.

Ключевые слова: защита информации, целостность данных, контроль и восстановление целостности данных, объём памяти, комплексные числа.

Традиционной задачей для пользователей автоматизированных систем (АС) различного назначения является защита обрабатываемых и хранящихся в них данных. Одной из мер обеспечения защищенности данных в АС является их защита от изменения и(или) уничтожения, то есть обеспечение их целостности [1]. Задача обеспечения целостности данных является сложной ввиду своей комплексности, так как включает в себя не только контроль целостности данных, но и ее восстановление [2, 3].

Целостность данных нарушается обычно в результате случайных ошибок, а также ошибок, генерируемых посредством преднамеренных воздействий злоумышленника [4–9] (несанкционированного изменения данных (например, посредством действия вредоносного кода) или выхода из строя части носителя (например, отдельных ячеек, секторов)).

В условиях непрерывного роста объема и ценности информации, обрабатываемой и хранящейся в АС, недостатком известных решений [10–13] является высокая избыточность контрольной информации, приводящей к преждевременному расходованию ограниченного ресурса рассматриваемых АС.

Известна работа [14], в которой представлен способ обеспечение целостности данных, результаты исследования которого позволили сделать вывод о возможности снижения вводимой избыточности контрольной информации за счет выполнения при контроле и восстановлении целостности данных преобразований в комплексной плоскости. В представленном решении информация, подлежащая защите, для обеспечения ее безопасности, разбивается на блоки данных, которые в дальнейшем представляются в виде комплексных чисел [15–19]. Для этого блоки данных представляются в комплексном виде [20]. С помощью геометрического построения определяется полная система наименьших вычетов [21–25].

При проведении исследования известного решения [14] выберем норму с модулем, которая должна быть больше самого большего числа в блоке данных [26]. Построим на комплексной плоскости точку с координатами, которая изображает комплексное число (рис. 1).

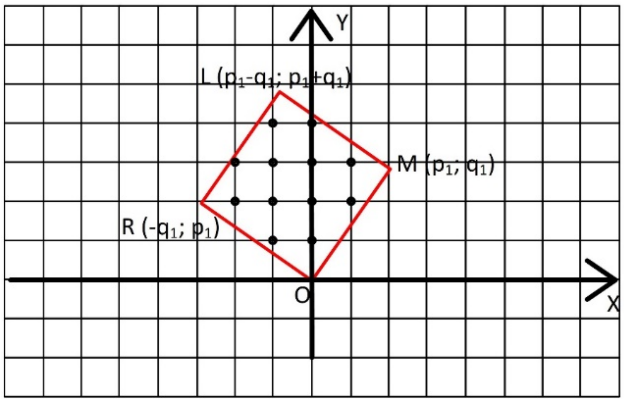


Рис. 1. Полная система наименьших вычетов

Наименьшими комплексными вычетами будут являться точки, расположенные внутри этого квадрата. Перечислим все целые комплексные числа, представляемых внутренними точками этого квадрата.

$$\begin{matrix} x_1+y_1i & x_1+y_2i & \cdots & x_1+y_fi, \\ x_2+y_1i & x_2+y_2i & \cdots & x_2+y_fi, \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n+y_1i & x_n+y_2i & \cdots & x_n+y_fi. \end{matrix}$$

Пример 1. Рассмотрим систему наименьших комплексных вычетов для нормы $N=25$ и модуля $m=3+4i$. Полную систему наименьших комплексных вычетов найдем с помощью геометрического построения. Отметим на комплексной плоскости точку M с координатами $(3;4)$, построим квадрат на стороне OM и перечислим все целые комплексные числа, находящихся внутри этого квадрата (рис. 2).

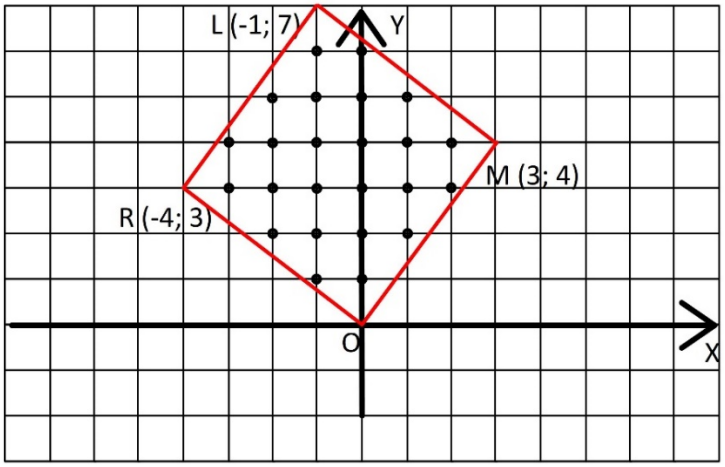


Рис. 2. Полная система наименьших комплексных вычетов для нормы $N=25$ ***и модуля*** $m=3+4i$

Таким образом, получим полную систему комплексных вычетов, представленную в таблице 1.

Таблица 1

Система наименьших комплексных вычетов для нормы $N = 25$

$1i$	$2i$	$3i$	$4i$	$5i$	$6i$
$-1+1i$	$-2+2i$	$-3+3i$	$-3+4i$	$-2+5i$	$-1+6i$
$1i$	$-1+2i$	$-2+3i$	$-2+4i$	$-1+5i$	$6i$
	$2i$	$-1+3i$	$-1+4i$	$5i$	
	$1+2i$	$3i$	$4i$	$1+5i$	
		$1+3i$	$1+4i$		
		$2+3i$	$2+4i$		

Переведем информацию, содержащуюся в подблоках данных M_j в комплексную форму из вещественной.

Вычислим вещественный вычет, который соответствует комплексному вычету по формуле Гаусса: $x + y(uq - vp) \equiv h(\mathrm{mod}\, N)$.

Найдем v и u из выражения $up + vq = 1$. Получим: $up_1 + vq_1 = 1$, $v_1 = \alpha$, $u_1 = \beta$. Откуда комплексному вычету $x_1 + y_1 i$ согласно формуле Гаусса для нормы N_1 с модулем $m_1 = p_1 + q_1 i$, будет соответствовать следующий вещественный вычет:

$$x_1 + y_1(\beta q_1 - \alpha p_1) \equiv h_1(\mathrm{mod}\, N_1), \tag{1}$$

где $h_1 = \gamma$.

Затем найдем вещественные вычеты, которые соответствуют комплексным вычетам из примера 1.

Норма $N = 25$ и модуль $m = 3 + 4i$. Найдем v и u из выражения $up + vq = 1$. Получим $3u + 4v = 1$, откуда $u = -1$, $v = 1$.

Подставим v и u в уравнение Гаусса и получим:

$$x + y(-3 - 4) \equiv h(\mathrm{mod}\, 25),$$

$$x - 7y \equiv h(\mathrm{mod}\, 25).$$

Далее получим вещественные вычеты, подставляя комплексные вычеты в уравнение Гаусса:

$$-1 - 7 \equiv h(\mathrm{mod}\, 25), \quad 0 - 7 \equiv h(\mathrm{mod}\, 25), \quad -2 - 14 \equiv h(\mathrm{mod}\, 25),$$

$$-8 \equiv h(\mathrm{mod}\, 25), \quad -7 \equiv h(\mathrm{mod}\, 25), \quad -16 \equiv h(\mathrm{mod}\, 25),$$

$$h_1 = 17; \quad h_2 = 18; \quad h_3 = 9.$$

Подобным образом установим соответствие между остальными комплексными и вещественными вычетами.

Таблица 2

Соответствие между комплексными и вещественными вычетами

Вещественный вычет	Комплексный вычет
1	$-3+3i$
2	$-2+3i$
3	$-1+3i$
4	$3i$
5	$1+3i$
6	$2+3i$
7	$-1+6i$
8	$6i$
9	$-2+2i$
10	$-1+2i$
11	$2i$
12	$1+2i$
13	$-2+5i$
14	$-1+5i$
15	$5i$
16	$1+5i$
17	$-1+1i$
18	$1i$
19	$-3+4i$
20	$-2+4i$
21	$-1+4i$
22	$4i$
23	$1+4i$
24	$2+4i$

Из представленной выше таблицы видно, что есть закономерность в том, что вещественный вычет увеличивается на единицу слева направо, начиная от «$-3+3i$» (вещественный вычет равен 1), заканчивая «$2+4i$» (вещественный вычет равен 24) (рис. 3).

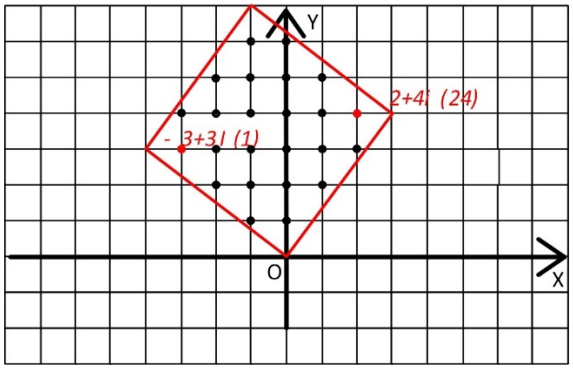


Рис. 3. Наименьший и наибольший вычеты в геометрическом представлении

Очередность следования по оси ординат формируется следующим образом: 1) $T/2$, где $T-$ это количество наименьших вычетов по оси ординат от 0 до границы квадрата; 2) T; 3) $T/2-1$; 4) $T-1$; 5) $T/2-2$; 6) $T-2$.

В рассматриваемом примере порядок следования по оси ординат следующий: $3i$, $6i$, $2i$, $5i$, $1i$, $4i$ (рис. 4).

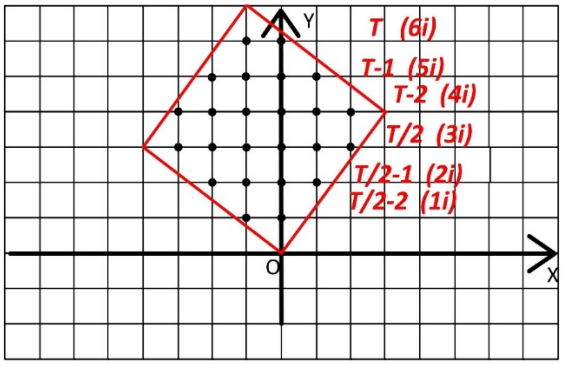


Рис. 4. Порядок следования по оси ординат

Такое свойство геометрического представления позволяет без вычислений (1) определить вещественный вычет и соответствующий ему комплексный вычет.

Таким образом, преобразования вида $x+yi \to h$ позволяют представлять данные массива M как вещественные вычеты h по выбранному модулю m и, соответственно изоморфные им комплексные вычеты.

Пусть имеем массив данных, который в своей геометрической интерпретации представляет квадрат, количество наименьших вычетов которого равно $N-1$, при $N=1000$. Следовательно, это приведет к затрате большего количества памяти, из-за чего придется тратить большее количество времени для осуществления передачи этой информации.

Для того, чтобы устранить данный недостаток предлагается хранить только те комплексные вычеты (они же вещественные вычеты), диапазон действительной и мнимой частей которых наибольший. В данном случае (см. пример 1) это будут действительные составляющие (-3, -2, -1, 0, 1, 2) и мнимые части ($1i$, $2i$, $3i$, $4i$, $5i$, $6i$) (рис. 5).

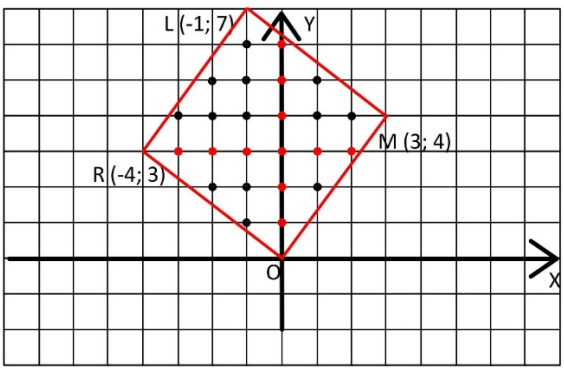


Рис. 5. Выбранные вычеты для хранения

Таким образом можно занимать меньшее количество ячеек памяти.

Допустим, в нашем случае занимается 24 ячейки памяти (24 вычета), но поскольку мы храним лишь часть вычетов, то всего ячеек будет 11. Соответственно, при больших размерах геометрического представления наименьших вычетов количество незарезервированных под хранение данных будет намного меньше.

Из всего вышеизложенного следует, что для устранения недостатков в виде большого количества занимаемой для хранения памяти и затрат во времени при передаче информации, использование комплексных чисел в достаточной мере обеспечило решении проблемы путем хранения лишь части составляющих вычетов.

Список литературы

1. Методический документ. Меры защиты информации в государственных информационных системах: утв. директором ФСТЭК 11.02.2014 // ФСТЭК России, 2014. 176 с.

2. Диченко С.А. Системный анализ проблемы обеспечения целостности данных в информационно-аналитических системах // В сборнике: Информатика: проблемы, методы, технологии. Материалы XX Международной научно-методической конференции. Под редакцией А.А. Зацаринного, Д.Н. Борисова. 2020. С. 1001–1005.

3. Алямкин А.В., Дорофеев А.А., Шевцов Н.И., Зубарев Я.И., Голояд М.В., Диченко С.А. Программная реализация и исследование способа обеспечения целостности многомерных массивов данных // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 5. С. 81–88.

4. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Методы построения математических моделей показателей качества результатов процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 1. С. 110-120.

5. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Метод моделирования процесса функционирования автоматизированной системы специального назначения в условиях деструктивных воздействий // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 2. С. 106-124.

6. Диченко С.А. Модель угроз безопасности информации защищенных информационно-аналитических систем специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 1-2 (163-164). С. 64–71.

7. Сухов А.М. Оценивание эффективности процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности на основе теории стохастической индикации // Информационно-управляющие системы. 2022. № 3 (118). С. 31–44.

8. Сухов А.М., Крупенин А.В., Якунин В.И. Метод вычисления показателя эффективности процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности // Автоматизация процессов управления. 2022. № 1 (67). С. 33–42.

9. Сухов А.М., Крупенин А.В., Табункова М.П. Принципы семиотического моделирования систем обнаружения вторжений в приложении к задачам внешнего проектирования проактивных систем обеспечения информационной безопасности и оценивания эффективности их применения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 7-8 (169-170). С. 94–102.

10. Dichenko S.A. An integrity control model for multidimensional data arrays // Automatic Control and Computer Sciences. 2021. Т. 55. № 8. С. 1188–1193.

11. Чечин И.В., Маринин А.А., Буянкин А.В., Соколов М.В., Новиков П.А., Диченко С.А., Самойленко Д.В. Контроль целостности данных на основе правил построения кодов с неравной защитой символов с использованием кодов Рида-Соломона // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 12. С. 279–289.

12. Сопин К.Ю., Диченко С.А., Самойленко Д.В. Криптографический контроль целостности данных на основе геометрических фракталов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 1. С. 85–95.

13. Стариков Т.В., Сопин К.Ю., Диченко С.А., Самойленко Д.В. Криптографический контроль целостности данных по правилам построения кода Рида-Соломона // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 1. С. 58–67.

14. Фадеев Р.В., Повчун И.О., Русов Г.Е., Лучко А.А., Новиков П.А., Диченко С.А., Самойленко Д.В. Комплексные числа и обеспечение целостности информации на их основе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 12. С. 371–380.

15. Понтрягин Л.С. Обобщения чисел. М.: Наука, 1986. 120 с.

16. Шахмейстер А.Х. Комплексные числа, 2014. 99 с.

17. Яглом И.М. Комплексные числа и их приложения в геометрии. Издание 2-е, стереотипное. М.: Едиториал УРСС, 2008. 112 с.

18. Маркушевич А.И. Комплексные числа и конформные отображения. М.: «Физмаиз», 2009. 96 с.

19. Андронов И.К. Математика действительных и комплексных чисел. – М.: Просвещение, 2008. 123 с.

20. Канунников А.Б. Магия комплексных чисел, 2017. 76 с.

21. Finko O., Dichenko S. Secure pseudo-random linear binary sequences generators based on arithmetic polynoms // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2015. Т. 342. С. 279–290.

22. Finko O., Samoylenko D., Dichenko S., Eliseev N. Parallel generator of q-valued pseudorandom sequences based on arithmetic polynomials // Przeglad Elektrotechniczny. 2015. Т. 91. № 3. С. 24–27.

23. Samoylenko D.V., Eremeev M.A., Finko O.A., Dichenko S.A. Parallel linear generator of multivalued pseudorandom sequences with operation errors control // SPIIRAS Proceedings. 2018. № 4 (59). С. 31–61.

24. Диченко С.А., Елисеев Н.И., Финько О.А. Контроль ошибок функционирования генераторов двоичных ПСП, реализованных на арифметических полиномах // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 4 (176). С. 142–149.

25. Диченко С.А. Алгоритм проверки достоверности контрольной информации, используемой при обеспечении целостности данных в условиях деструктивных воздействий злоумышленника и среды // Информатика: проблемы, методы, технологии. Материалы XX Международной научно-методической конференции. Под редакцией А.А. Зацаринного, Д.Н. Борисова. 2020. С. 996–1000.

26. Ямашкин С.А., Ямашкин А.А. Интеграция, хранение и обработка больших массивов пространственно-временной информации в цифровых инфраструктурах пространственных данных // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 5. С. 108–113.

Лучко Антон Антонович, сотрудник, anton.luchko@mail.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище им. С.М.Штеменко,

Фадеев Роман Викторович, сотрудник, roma-70594@yandex.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище им. С.М.Штеменко,

Повчун Иван Олегович, сотрудник, sharapov181@rambler.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище им. С.М.Штеменко,

Шкилев Николай Владимирович, сотрудник, shkilev.1996@mail.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище им. С.М.Штеменко,

Новиков Павел Аркадьевич, канд. техн. наук, сотрудник, novikov.p.ark@yandex.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище им. С.М.Штеменко,

Дичeнко Сергей Александрович, канд. техн. наук, сотрудник, dichenko.sa@yandex.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище им. С.М.Штеменко,

Самойленко Дмитрий Владимирович, д-р техн. наук, сотрудник, 19sam@mail.ru, Россия, Краснодар, Краснодарское высшее военное училище им. С.М.Штеменко

INVESTIGATION OF THE VOLUME OF INTRODUCED REDUNDANCY TO ENSURE DATA INTEGRITY BASED ON TRANSFORMATIONS IN THE COMPLEX PLANE

A.A. Luchko, R.V. Fadeev, I.O. Povchun, N.V. Shkilev, P.A. Novikov, S.A. Dichenko, D.V. Samoylenko

Analysis of known methods of ensuring data integrity has shown that in conditions of continuous growth in the volume and value of information processed and stored in automated systems for various purposes, the main disadvantage is the high redundancy of control information, leading to premature consumption of the limited resource of the systems under consideration. A method of ensuring data integrity based on number-theoretic transformations in the complex plane is considered and the results of its research related to the possibility of reducing the amount of introduced redundancy in its application are presented.

Key words: information protection, data integrity, control and restoration of data integrity, memory capacity, complex numbers.

Luchko Anton Antonovich, employee, anton.luchko@mail.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko,

Fadeev Roman Viktorovich, employee, roma-70594@yandex.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko,

Povchun Ivan Olegovich, employee, sharapov181@rambler.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko,

Shkilev Nikolay Vladimirovich, employee, shkilev.1996@mail.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko,

Novikov Pavel Arkadievich, candidate of technical sciences, employee, novikov.p.ark@yandex.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko,

Dichenko Sergey Alexandrovich, candidate of technical sciences, employee, dichenko.sa@yandex.ru, Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko,

Samoylenko Dmitry Vladimirovich, doctor of technical sciences, employee, 19sam@mail.ru Russia, Krasnodar, Krasnodar Higher Military School named after S.M. Shtemenko

УДК 621.833
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-224-225

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПОДГОТОВКИ IT-СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ УЧАСТИЯ В КОНКУРСЕ «УВЕРЕННЫЙ ПРИЁМ» В РАМКАХ АРМЕЙСКИХ МЕЖДУНАРОДНЫХ ИГР

И.Н. Репьев, А. И. Сысойкин, Д. И. Репьева

В статье рассматриваются последовательность этапов отбора, подготовки и дальнейшему совершенствованию порядка отбора и организации подготовки IT-специалистов для участия в конкурсе «Уверенный прием», проводимого в ходе Армейских международных игр. Предлагается использовать (внедрить), применяемую методику в войсках связи Вооруженных сил Российской Федерации, для организации и проведения игр (конкурсов) среди высших учебных заведений Российской Федерации.

Ключевые слова: уверенный прием, отбор, подготовка IT-специалистов.

Исходя из конкретных задач подготовки команды к конкурсу «Уверенный приём» (далее — конкурс) в рамках Армейских международных игр необходимо вести постоянную работу по дальнейшему совершенствованию порядка отбора и организации подготовки IT-специалистов с учетом опыта подготовки и проведения конкурса прошлых лет.

Согласно требований Положения о конкурсе [1] (далее — Положение) команда IT-специалистов состоит из четырех военнослужащих (3 — основных, 1 — запасной).

Претендентами для участия в этапе конкурса «Работа на оборудовании IT-структуры» являются победители отборочных соревнований специалистов связи, проводимых в странах-участницах.

К участию в отборочных этапах конкурса допускаются претенденты способные:

осуществлять монтаж кабелей связи и оконечных кабельных устройств;

производить измерения и расчет основных параметров волоконно-оптических линий связи военного и двойного назначения;

эксплуатировать базовые образцы техники оптической связи и систем коммутации военного и двойного назначения;

производить проверку работоспособности, выявления и устранения основных неисправностей аппаратуры оптических систем передачи и систем коммутации военного и двойного назначения.

Отбор в команду IT-специалистов предпочтительно осуществлять из числа военнослужащих, обучающихся или прошедших обучение по специализациям (специальностям):

«Оптические системы связи»;

«Многоканальные телекоммуникационные системы»;

«Системы коммутации и сети связи специального назначения».

В ходе первого этапа осуществляется отбор IT-специалистов в команду из числа военнослужащих по месту их службы, с учетом специфики конкурса.

Для участия в конкурсе может производиться отбор курсантов из числа обучающихся третьего и четвертого курсов.

При отборе обратить особое внимание, чтобы военнослужащие были профессионально подготовлены, с обязательным медицинским освидетельствованием, результатами психологического обследования, служебными характеристиками и ведомостями сдачи физической подготовки.

Предварительно отбираются 15-20 претендентов, которые исключаются из состава команды последовательно по результатам контрольно-проверочных мероприятий.

Формирование и подготовка команд к первому этапу Всеармейских соревнований осуществляется в ходе второго этапа подготовки IT-специалистов к конкурсу [2].

На данном этапе наряду с теоретической подготовкой и изучением Положения о конкурсе осуществляется практическая подготовка, заключающаяся в отработке упражнения по элементам (сварка оптического волокна, произведение измерений и расчет параметров, настройка маршрутизатора, развертывание полевой кабельной линии и полевой волоконно-оптической линии связи, монтаж кабеля разъемом RJ-45), а также комплексная отработка упражнения [3,4].

Вариант плана подготовки IT-специалистов к Первому этапу Всеармейских соревнований, состоит из трех типовых месяцев, каждый из которых включает четыре типовые недели [2]. В первую и вторую недели первого месяца подготовки участники команды изучают теоретические основы монтажа и обслуживания волоконно-оптических линий связи, в третью и четвертую формируют практические навыки монтажа и обслуживания волоконно-оптических линий связи.

Во второй месяц подготовки участники в первую неделю изучают теоретические основы IP-адресации и маршрутизации, во вторую формируют практические навыки IP-адресации и маршрутизации. На третьей неделе второго месяца подготовки участники изучают теоретические основы положения о конкурсе «Уверенный прием» и на четвертой неделе переходят к выполнению упражнения по разделениям.

На третьем месяце подготовки в течение первой недели упражнение отрабатывается по элементам, после чего на протяжении второй, третьей и четвертой недель осуществляется отработка упражнения этапа в комплексе.

Проведение тренировочного сбора IT-специалистов по итогам проведения Первого этапа Всеармейских соревнований, проведение среди них отборочных соревнований и по итогам отборочных соревнований отбор лучших IT-специалистов в состав команды для участия в конкурсе осуществляется на третьем этапе.

На третьем этапе в процессе интенсивной практической подготовки в ходе выполнения упражнения этапа моделируются различные проблемные ситуации, для формирования у участников навыков и способностей устранения возможных неисправностей. Оптимизируются временные показатели команды за счет одновременного, параллельного выполнения сразу нескольких элементов упражнения каждым из участников.

Прорабатываются гибкие динамические сценарии действий для каждого участника, содержание которых зависит от времени и вероятности успешных действий напарников по команде.

С целью резервирования состава команды IT-специалистов на третьем этапе она должна включать 3-4 состава команд-претендентов (12-16 человек), которые исключаются по результатам контрольно-проверочных мероприятий.

Вариант плана подготовки IT-специалистов к конкурсу в ходе третьего этапа включает три типовых месяца [2], каждый из которых включает четыре типовые недели.

В первую и вторую недели первого месяца участники выполняют упражнение по элементам и начинают отрабатывать в комплексе. В течение третьей и четвертой недель первого месяца упражнение выполняется в комплексе.

На протяжении второго месяца идет интенсивная подготовка в условиях повышенной физической нагрузки, с моделированием проблемных ситуаций, использованием различного имеющегося оборудования, изменением формата заданий.

На третьем месяце формируется окончательный состав команд для участия в конкурсе. В течение первой и второй недель продолжается интенсивная подготовка, после чего команды убывают к местам проведения конкурса. Подготовка на третьей и четвертой неделе осуществляется на собственном оборудовании и оборудовании в местах размещения команд, а также на оборудовании [5], предоставленном принимающей стороной.

Окончательное формирование команды IT-специалистов для участия в Международном конкурсе «Уверенный прием» осуществляется на основе анализа результатов, продемонстрированных на еженедельных, ежемесячных контрольных занятиях, отборочных соревнованиях по окончанию третьего этапа подготовки, а также на основе рекомендаций психолога и результатов анализа психологической службы.

Список литературы

1. Положение о проведении конкурса «Уверенный прием» в ходе соревнований «Армейские международные игры - 2022». Москва: Главное управление связи, 2022. 93 с.

2. «Методические рекомендации по отбору и подготовке команды к конкурсу «Уверенный приём», проводимого в ходе Армейских международных игр». Санкт-Петербург: Военная академия связи, 2021. 157 с.

3. Программа для ЭВМ «Уверенный приём». Порядок подготовки команды специалистов связи к конкурсу». Санкт-Петербург: Фонд алгоритмов и программ. Военная академия связи, 2022.

4. Методический фильм «О проведении конкурса специалистов связи «Уверенный приём», проводимого в рамках Армейских международных игр, судейства на нем и порядка начисления штрафных баллов на каждом этапе конкурса» (на русском языке), г. Санкт-Петербург: ВАС, 2022 г., 1,84 Гб. [Электронный ресурс] URL: http:/armygames2022.mil.ru (дата обращения: 10.05.2023).

5. «Альбом- формуляр конкурса специалистов связи «Уверенный прием», проводимого в ходе Армейских международных игр». Санкт- Петербург: Военная академия связи, 2021. 108 с.

Репьев Игорь Николаевич, канд. воен. наук, доцент, repev85@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Сысойкин Андрей Игоревич, слушатель, andrey_sysoikin@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Репьева Дарья Игоревна, студент, a_sentient_being@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет

THE SEQUENCE OF TRAINING IT SPECIALISTS TO PARTICIPATE IN THE "CONFIDENT RECEPTION" COMPETITION WITHIN THE FRAMEWORK OF THE ARMY INTERNATIONAL GAMES.

I.N. Repyev, A.I. Sysoikin, D.I. Repeva

The article discusses the sequence of stages of selection, preparation and further improvement of the procedure for selecting and organizing the training of IT specialists to participate in the "Confident Reception" competition held during the Army International Games. It is proposed to use (implement) the methodology used in the communications troops of the Armed Forces of the Russian Federation for organizing and holding games (competitions) among higher educational institutions of the Russian Federation.

Key words: Confident reception, selection, training of IT specialists.

Repyev Igor Nikolaevich, candidate of military sciences, docent, repev85@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Sysoikin Andrey Igorevich, listener, andrey_sysoikin@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Red Banner Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Repeva Daria Igorevna, student, a_sentient_being@mail.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State University

УДК 004.896
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-226-227

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

А.Ю. Горшенин, А.С. Грицай, Л.А. Денисова

В работе рассмотрены вопросы краткосрочного прогнозирования электрической энергии с использованием машинного обучения ансамбля деревьев решений градиентного бустинга Catboost. Определены значимые технологические параметры и размер обучающей выборки для построения прогноза электропотребления на сутки вперёд с требуемой точностью.

Ключевые слова: прогнозирование электропотребления, машинное обучение, деревья решений, градиентный бустинг.

Введение. В настоящее время энергосбытовым компаниям необходимо иметь возможность как можно точнее прогнозировать электропотребление для обеспечения эффективного управления и планирования распределения электроэнергии между потребителями [1-8]. Поэтому разработка методов и средств прогнозирования электропотребления является актуальной задачей. Наиболее популярными методами в прогнозировании электропотребления являются – статистические, которые основаны на построении временных рядов, такие как *ARIMA* (*AutoRegressive Integrated Moving Average*) [1] и использование взвешенных средних для прогнозирования будущих значений временного ряда (экспоненциальное сглаживание) [2].

Широкое распространение получили методы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), например, рекуррентные нейронные сети [3], *LSTM* (*Long Short-Term Memory*) [9]. Ключевыми преимуществами являются возможности обработки последовательных данных (в том числе обновляемые в реальном масштабе времени), и осуществление многоэтапного прогнозирования, уточняя будущие значения на несколько временных шагов вперед.

Также востребованными являются методы машинного обучения, основанные на построении деревьев решений, такие как, метод случайного леса [10] и градиентный бустинг деревьев решений [11]. В отличие от методов на основе ИНС, методы градиентного бустинга ансамблей деревьев решений (далее, рассмотрено применение метода *Catboost* [12]) используют наименьшее количество данных и времени для обучения, менее подвержены переобучению, и не так чувствительны к выбору гиперпараметров. Методы на основе ИНС часто считаются «черными ящиками», то есть их решения сложно интерпретируются [3]. Отличительной характеристикой ансамбля деревьев решений является более легкая интерпретируемость [12] и возможность проведения анализа важности каждого признака, в том числе объяснение принятия решений моделью.

В работе рассмотрены вопросы формирования обучающей выборки для модели краткосрочного (на сутки вперед) прогнозирования электропотребления с использованием метода *Catboost,* определяя значимые технологические параметры и размер обучающей выборки.

Исходные данные. В исследовании использованы данные, полученные от энергосбытовой компании АО «АтомЭнергоСбыт» и представленные массивом, состоящих из почасовых наблюдений технологических параметров [13], за период от 01.12.2021 г. до 30.06.2023 г. (два года). Фрагмент исходных данных представлен в табл. 1, в которую включены ретроспективные данные по электропотреблению (W, МВт*ч) в каждый момент сбора данных (*Timestamp*). Также в таблицу входят метеоданные: T_A – температура окружающей среды, °С; φ – относительная влажность воздуха, %; V_W – скорость ветра, м/с. Учитывалась доля длительности светового дня: $L_d = ((m/60 + h)/24) * 100$, где $m(h)$ – минуты(часы) продолжительности светового дня (выбраны с информационных сервисов погоды [14]). Кроме того, учитывались технологические параметры региональной инфраструктуры, такие как: C_{wd} – индекс рабочего дня: рабочие (0), выходные (1), предпраздничные (3), праздничные дни (2), новогодние выходные (4) и нерабочие дни, связанные с событиями пандемии *COVID*-19 (5), на основе производственных календарей [15]; N_d (N_m, N_{md}) – номера дней недели (месяца, порядковый номер дня в месяце); H – время, час; L – индекс работы городского освещения; I_h – индекс включения/отключения центрального отопления. Информация о работе городского освещения и центрального отопления получена из официальных источников Мурманской области [16]; W_p – значение электропотребления (за предыдущие сутки), МВт*ч. В таблице дополнительно рассчитан мультипликативный параметр *Mult* (произведение относительной влажности воздуха, φ и скорость ветра, V_W).

Установлено, что параметры потребления электроэнергии зависят от метеоусловий и других технологических параметров, поэтому они предварительно проверялись на наличие корреляционных зависимостей (описание выявления корреляционных связей, проводимого аналогично, между параметрами энерговыработки изложены в [3]). Исходя из результатов корреляционного анализа было решено провести анализ возможности сокращения признакового пространства для построения прогноза.

При выполнении исследования рассмотрена модель прогнозирования на основе метода машинного обучения *Catboost*, который является одним из немногочисленных методов, не требующих предварительной обработки данных. *Catboost* автоматически обрабатывает категориальные переменные (обозначаемые не числами, а условными символами) и дополняет пропущенные значения, что упрощает его применение. К недостаткам метода можно отнести отсутствие автоматической обработки аномальных значений, поэтому входные данные предварительно обрабатывались (очищались от выбросов) с использованием метода инквартильного размаха (*IQR – Interquartile Range*) [17]. На основе этих исходных данных формировались обучающие и тестовые выборки.

Для определения структуры и необходимого объема обучающей выборки, обеспечивающих требуемую точность прогнозирования, сформировано два варианта обучающей выборки. В первом случае, рассматриваются все доступные технологические параметры в исходном наборе данных (вариант B_1). Во втором случае, выбираются параметры, имеющие наибольшее значение коэффициента корреляции с электропотреблением (вариант B_2). Для оценки функционирования модели в качестве критерия рассматривалась ошибка прогноза электропотребления.

Для обоих полученных вариантов обучающей выборки производился анализ вклада каждого входного параметра в значение прогноза с целью определения возможности сокращения количества входных параметров в модель.

Таблица 1

Исходные данные для прогнозирования электропотребления (фрагмент)

Момент времени (*Timestamp*)	**Технологические параметры**													
	W	T_A	L_d	C_{wd}	N_d	N_m	N_{md}	***H***	***L***	φ	V_W	I_h	W_p	***Mult***
01.12.2021 0:00	504,3	-8,3	0,032	0	3	12	1	0	1	90	2	1	526,2	180
01.12.2021 1:00	483,7	-7,1	0,032	0	3	12	1	1	1	89,6	3	1	506,2	268,8
01.12.2021 2:00	469,231	-6,0	0,032	0	3	12	1	2	1	89,3	4	1	495,4	357,3
01.12.2021 3:00	462,988	-4,8	0,032	0	3	12	1	3	1	89	5	1	490,8	445
01.12.2021 4:00	461,717	-4,3	0,032	0	3	12	1	4	1	83	5,3	1	487,3	439,9
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	
30.06.2023 23:00	286,8	7,7	1	0	5	6	30	23	0	74,3	3	0	256,9	222,9

Определение вклада входных технологических параметров в значение прогноза. Для определения вклада каждого из технологических параметров в прогноз электропотребления использовался метод *SHAP* [18] (*SHapley Additive exPlanations*). Этот метод позволяет определить важность и вклад каждого параметра в результат прогноза при машинном обучении.

Вклад каждого параметра определяется с помощью *SHAP*-значений, вычисляемых по формуле:

$$S_i(x) = \sum_{S \subseteq N\{i\}} \frac{|S|!\,(|N| - |S| - 1)!}{|N|!} [f(x_S \cup \{i\}) - f(x_S)]\,,$$

где $S_i(x)$ – *SHAP*-значение для i-го параметра и наблюдения x; N – множество параметров, $|N|$ – его размер; S – подмножество параметров, исключая i-й параметр; $|S|$ – размер подмножества S; x_S – наблюдение x с учетом только параметров из множества S; $f(x_S \cup \{i\})$ – прогноз модели для наблюдения x_S, включая i-й параметр; $f(x_S)$ – прогноз для наблюдения x_S.

В основе понятия *SHAP*-значений заложена идея распределения вклада каждого признака (параметра) в предсказание между всеми возможными комбинациями параметров. Происходит учет всех возможных перестановок признаков, определяющих насколько изменяется предсказание при добавлении или удалении отдельных параметров. Каждому параметру присваивается его *SHAP*-значение, которое показывает, насколько он внес вклад в прогнозируемое значение.

Для определения структуры обучающей выборки и выявления значимости каждого параметра построены графики для двух вариантов структуры входных данных (рис. 1). Графики 1,а и 1,б созданы на основе обработки исходных данных B_1 и B_2, соответственно.

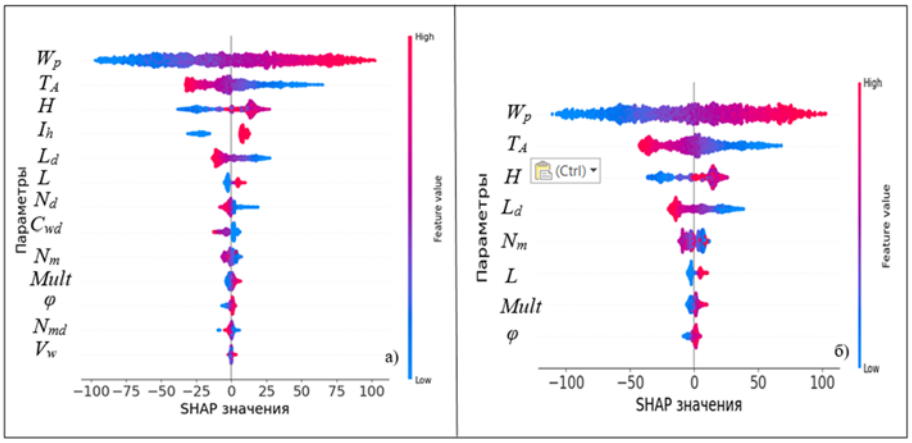


Рис. 1. Выявление наиболее важных параметров для вариантов прогнозирования: а – B_1; б – B_2

На рис. 1 цветовая схема на графиках указывает на обозначение силы влияний параметров на прогноз: красный цвет указывает сильное влияние, синий цвет – на слабое. Значимость параметра определяется его очередностью (сверху вниз), чем выше находится параметр, тем больше его значения воздействуют на итоговый прогноз. Степень влияния на увеличение или уменьшение прогнозных значений определяется по оси абсцисс: чем больше параметр распределяется по оси абсцисс, тем больше он склонен к увеличению или уменьшению прогнозных значений. Параметры, которые не имеют распределения и сфокусированы на нулевом значении не вносят никаких изменений в прогноз.

Таким образом, на графиках отображены наиболее значимые по воздействию параметры вне зависимости от размера обучающей выборки, такими параметрами являются W_p, H, T_A, L_d. Получено, что наибольшее распределе-

ние (по оси абсцисс) имеет W_p (значение электропотребления за предыдущие сутки), определяющий сильную зависимость прогноза от значений W_p. Но даже при наименьшем значении параметра, (например, L не выходящем за переделы от -25 до 25 по оси абсцисс) он вносит вклад в итоговый выход модели.

С использованием метода *SHAP* получены интерпретируемые значения вклада каждого признака в конкретный прогноз модели. При этом входные параметры сравнивались между собой для определения значимости для конечного результата и определения их вклада в прогнозные значения. Те параметры, значимость которых высока, должны быть использованы для построения прогноза в обязательном порядке. Параметры, вносящие наименьший вклад, могут не рассматриваться, если не предъявляются высокие требования к точности прогноза. Отсутствие менее значимых параметров (в случае трудности сбора данных) позволяет сделать прогноз, но качество прогноза ухудшится.

По итогу метода анализа *SHAP* для рассматриваемых вариантов выявлены значимые параметры (в порядке убывания): значение электропотребления за предыдущие сутки W_p, время в часах H, температура окружающей среды T_A, доля длительности светового дня L_d, которые требуют обязательного присутствие в обучающей выборке для прогнозирования электропотребления.

Прогнозирование электропотребления с использованием деревьев решений. Для получения краткосрочного прогноза электропотребления с помощью метода *Catboost* [12], построен ансамбль деревьев решений. На рис. 2. показана структура построенного ансамбля деревьев решений ($h^0(x)$, $h^t(x)$, …, $h^{999}(x)$).

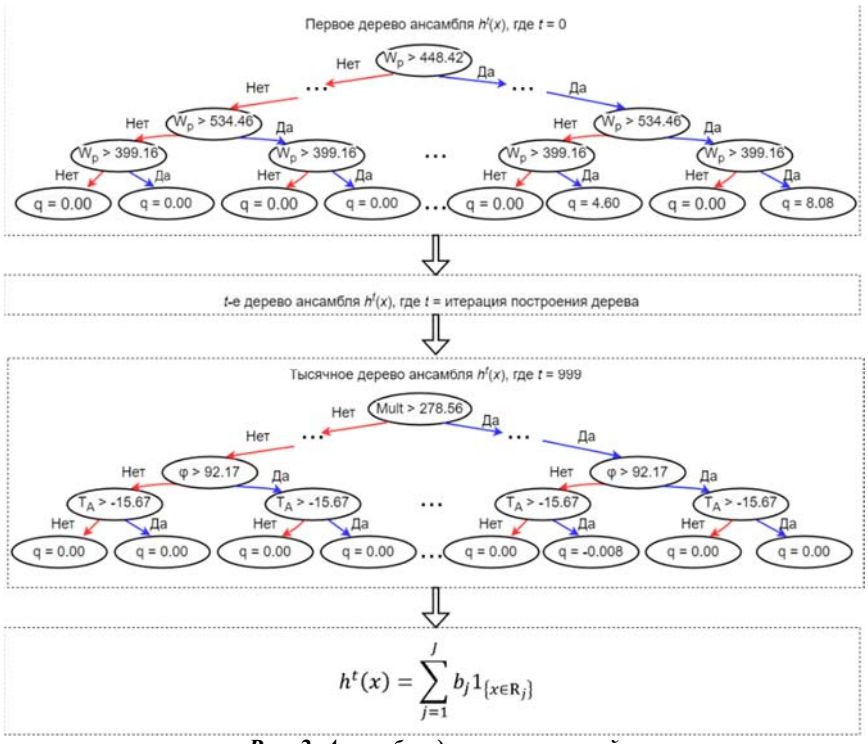


Рис. 2. Ансамбль деревьев решений

Рассмотрим подробнее построенный ансамбль деревьев решений. Видно, что ансамбль состоит из 1000 деревьев (которые строятся итерационно), выход каждого предыдущего дерева является входом в последующее (см. рис. 2). Автоматически формируется гиперпараметр, такой как максимальная глубина деревьев, а гиперпараметр, соответствующий их количеству, определяется методом поиска по сетке (*Grid Search*). Метод поиска *Grid Search* принято использовать при машинном обучении совместно с методом градиентного бустинга *Catboost*. Результат анализа устанавливает, что оптимальное расстояние от корневой вершины до любого из листьев составляет 10 узлов, итераций (деревьев) в ансамбле – 1000. При прогнозировании с использованием таких гиперпараметров модели переобучение не происходит.

В построенном ансамбле деревьев решений *Catboost*, первое дерево иллюстрирует начальное приближение целевой функции, так как ансамбль деревьев стремится аппроксимировать целевую функцию, чтобы производить наиболее точные прогнозы на основе обучающей выборки. Последующие деревья обучаются так, чтобы уточнить предсказания, сделанные предыдущими деревьями. Каждое последующее дерево пытается скорректировать ошибки и улучшить аппроксимацию целевой функции. Этот процесс продолжается итеративно, и ансамбль стремится приблизиться к оптимальной модели, которая минимизирует ошибку на обучающих данных и способна прогнозировать на новых.

Ансамбль деревьев решений основан на исходном наборе данных $D = \{(x_k,y_k)\}_{k=0\ldots n}$, где $x_k = (x_k^1, \ldots, x_k^m)$ – случайный вектор из m признаков, а $y_k \in R$ – числовая целевая переменная; вектор признаков $x = \{T_A, L_d, C_{wd}, N_d, N_m, N_{md}, H, L, \varphi, V_W, I_h, W_p, Mult\}$. Задача метода построения деревьев решений заключается в обучении функции $F : \mathbf{R}^m \rightarrow \mathbf{R}$, которая минимизирует ожидаемую функцию потерь $L(F) := EL(y,F(x))$, где $L(.,.)$ – функция потерь, а (x,y) тестовый пример выбранный из обучающего набора D.

Поясним работу градиентного бустинга, который последовательно улучшает прогнозы, создавая функции F^t (суммарный прогноз) для каждой итерации t. К каждой новой функции F^t добавляется предыдущая F^{t-1} с определенным размером шага α, чтобы минимизировать потери. Для оптимизации каждой функции h^t (базовая функция,

которая добавляется к F^t, чтобы улучшить его на следующей итерации) применяется градиентный бустинг и аппроксимация методом наименьших квадратов. Применяемый метод Catboost использует бинарные деревья решений в качестве базовых предсказателей, что позволяет разделять пространство признаков на области, основываясь на значениях атрибутов разделения.

Каждой конечной области (листу дерева) присваивается значение, которое является оценкой целевой переменной y для задачи регрессии [17]. Таким образом, дерево решений h можно записать как $h^t(x) = \sum_{j=1}^{J} b_j 1_{\{x \in R_j\}}$, где R_j – непересекающиеся области, соответствующие листьям дерева; b_j – значение, присвоенное листу дерева j (как оценка целевой переменной).

Результаты краткосрочного прогнозирования электропотребления. Для оценивания качества работы и производительности сформированного ансамбля деревьев решений *Catboost* применялись метрики, характеризующие точность модели [3]. Значения метрик качества модели от различных структур входных данных и объемов обучающей выборки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Метрики качества модели прогнозирования электропотребления

Метрики прогноза	Вариант прогноза	
	B_1	**B_2**
$MAPE_{model}$	1.39%	2.05%
$MAPE$	1.94%	2.76%
$RMSE$	7.03	11.46
R^2	0.994	0.986

Используя набор данных B_1 с полными технологическими параметрами, модель продемонстрировала лучшие результаты прогнозирования, как указано в таблице 2. Метрика *RMSE* показала небольшую разницу между фактическими и прогнозируемыми значениями (7.03 МВт*ч в лучшем варианте B_1), и коэффициент детерминации R^2 = 0.994, что говорит о хорошем соответствии модели фактическим данным (99.4%). Метрика *MAPE* также подтвердила качество прогноза средней абсолютной процентной ошибкой в 1.94%.

На основании полученных результатов сделан вывод о том, что для краткосрочного (на сутки вперед) прогнозирования электропотребления целесообразно использовать полный набор доступных технологических параметров, так как он позволяет модели выявить существующие закономерности и зависимости в данных.

График краткосрочного прогнозирования электропотребления методом машинного обучения *Catboost* за период с 01.07.2023 по 31.07.2023 г. представлен на рис. 3.

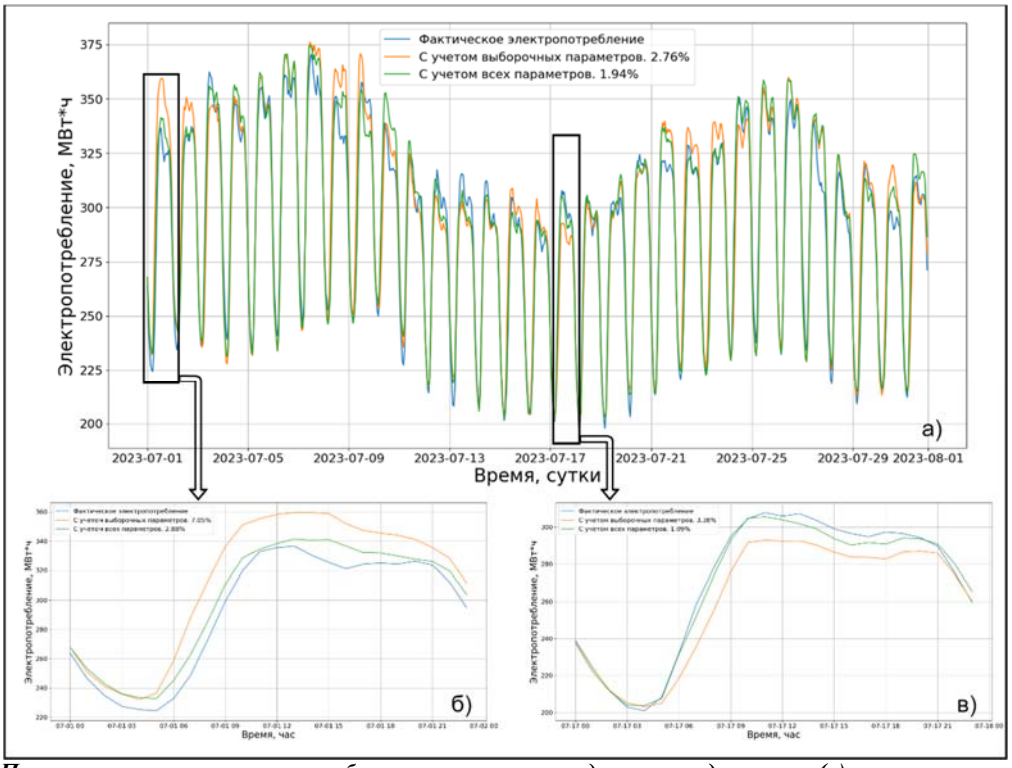


Рис. 3. Прогнозирование электропотребления на сутки вперед в полном диапазоне (а); и в увеличенном масштабе в период выходного (б) и рабочего дня (в)

Синим цветом на графике представлено распределение ретроспективных данных за июль 2023 года, желтым – значения прогноза модели с набором данных B_2, зеленым – значения прогноза модели с полным набором технологических параметров. Рис. 3, а иллюстрирует качество прогнозирования электропотребления на сутки вперед (полный диапазон значений). Для наглядности на рис. 3, б и 3, в показаны периоды выходного и рабочего дней (в увеличенном масштабе), в которых наблюдается присутствие ошибки между прогнозируемыми значениями электропотребления и реальными (ретроспективными) данными. Прослеживается, что на графиках в увеличенном мас-

штабе (выходной и рабочий дни) наилучшие результаты получены моделью с полным набором технологических параметров (B_1). Ошибка прогноза уменьшилась на 0.82% по метрике *MAPE*, что является существенным улучшением точности прогнозирования электропотребления.

Обсуждение результатов. В результате исследования сформирована обучающая выборка, выбрана структура данных для прогнозирования электропотребления методом машинного обучения на основе градиентного бустинга деревьев решений *Catboost*. Сделан вывод о том, что количество наблюдений и параметров в обучающей выборке влияют на конечные результаты прогнозных значений (B_1 *MAPE* = 1,94%, B_2 *MAPE* = 2,76%). Выявление значимых параметров позволяет не включать в обучающую выборку параметры, имеющих наименьших вклад, отсутствие которых позволит сделать прогноз, но с потерей качества.

Заключение. Проведенные исследования позволили установить, что использование метода машинного обучения на основе градиентного бустинга деревьев решений *Catboost* [12] для прогнозирования электропотребления на краткосрочный период является эффективным подходом.

Метод градиентного бустинга деревьев решений, использованный в исследовании, уменьшает дисперсию прогнозов и обладает устойчивостью к переобучению, что доказывает его функциональность на больших обучающих выборках. Модель, обученная на большой выборке, также более устойчива к случайным флуктуациям данных и аномалиям.

В дальнейшем планируется исследовать возможность использования эффективного метода градиентного бустинга *XGBoost* [19] (имеет более гибкую настройку, в отличие от *Catboost*) для краткосрочного прогнозирования электропотребления, и объединение этих двух методов. Применение представленных методов позволит в дальнейшем энергосбытовым компаниям планировать необходимый объем резерва электроэнергии.

Список литературы

1. Валь П.В. Краткосрочное прогнозирование электропотребления горного предприятия с использованием однофакторных методов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2011. № 2(35). С. 12–17.

2. Исследование методов аппроксимации для решения задачи краткосрочного прогнозирования суточного электропотребления / Р.Н. Хамитов, А.С. Грицай, И.В. Червенчук, Г.Э. Синицин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2016. № 4(52). С. 91–98.

3. Горшенин А.Ю., Денисова Л.А. Прогнозирование выработки электроэнергии ветроэлектростанцией с применением рекуррентной нейронной сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 39–45.

4. Денисова Л.А. Математическая модель цифровой системы регулирования с переменными параметрами // Автоматизация в промышленности. 2011. №9. С. 45–48.

5. Горшенин, А. Ю. Методы прогнозирования в информационных системах // Прикладная математика и фундаментальная информатика: Материалы XII Международной молодежной научно-практической конференции с элементами научной школы, Омск, 16–21 мая 2022 года / Отв. редактор А.В. Зыкина. Омск: Омский государственный технический университет. 2022. С. 82–83.

6. Васина, Д. И. Актуальные проблемы применения солнечной электроэнергии и прогнозирования // Информационные технологии в науке и производстве : Материалы X Всероссийской молодежной научно-технической конференции, Омск, 18 апреля 2023 года / Редколлегия: А.Г. Янишевская (отв. ред.) [и др.]. Омск: Омский государственный технический университет, 2023. С. 89–91.

7. Васина, Д. И. Описание программы для проведения анализа выработки мощности постоянного и переменного токов солнечной электростанции // Актуальные вопросы энергетики : Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Омск, 25–26 мая 2023 года / Редколлегия: П.А. Батраков (отв. ред.) [и др.]. – Омск: Омский государственный технический университет, 2023. С. 133–137.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663519 Российская Федерация. Предварительная обработка: заполнения пропусков в данных : № 2023662273 : заявл. 13.06.2023 : опубл. 23.06.2023 / А. Ю. Горшенин, Д. И. Васина ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет».

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611595 Российская Федерация. Программа для прогнозирования выработки электроэнергии ветроэлектростанции методом LSTM : № 2022686636 : заявл. 30.12.2022 : опубл. 23.01.2023 / А. Ю. Горшенин ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет».

10. 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., Казань, 19–23 сентября 2016 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2016. С. 124–127.

11. Горшенин А.К., Мартынов О.П. Гибридные модели экстремального градиентного бустинга для восстановления пропущенных значений в данных об осадках // Информатика и ее применения. 2019. Т. 13, № 3. С. 34–40.

12. CatBoost: unbiased boosting with categorical features / L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev, A. V. Dorogush, A. Gulin // Advances in Neural Information Processing Systems. 2018. PP. 6638–6648. URL : https://arxiv.org/pdf/1706.09516.pdf

13. Горшенин А.Ю., Николаев А.В. Прогнозирование энергопотребления: анализ ежедневных моделей и факторов влияния // Актуальные вопросы энергетики : Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Омск, 25–26 мая 2023 года / Редколлегия: П.А. Батраков (отв. ред.) [и др.]. – Омск: Омский государственный технический университет. 2023. С. 152–154.

14. Восход и заход солнца. // Datetime : URL: https://dateandtime.info/ru/ (дата обращения: 25.09.2023).

15. Производственные календари. // КонсультантПлюс [Электронный ресурс] URL: https://www.consultant.ru/law/ref/calendar/proizvodstvennye (дата обращения: 25.09.2023).

16. Администрация города Мурманска. // Официальный сайт администрации города Мурманска [Электронный ресурс] URL: https://www.citymurmansk.ru (дата обращения: 25.09.2023).

17. Wan X. et al. Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range //BMC medical research methodology. 2014. Т. 14. С. 1–13.

18. Friedman. J. H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine // Annals of statistics. 2001. PP. 1189–1232.

19. Chen, T., Guestrin, C. XGBoost: A scalable tree boosting system, arXiv.org. Available at, 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1603.02754.

Горшенин Алексей Юрьевич, аспирант, ayugorshenin@omgtu.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Грицай Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, aleksandr.gritsay@gmail.com, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Денисова Людмила Альбертовна, д-р техн. наук, профессор, denisova@asoiu.com, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

APPLICATION OF MACHINE LEARNING OF DECISION TREES FOR SHORT-TERM FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION

A.Y. Gorshenin, A.S. Gritsay, L.A. Denisova

The paper examines the issues of short-term forecasting of electrical energy using machine learning of an ensemble of decision trees for gradient boosting Catboost. Significant technological parameters and the size of the training sample were determined to build a forecast of power consumption for the day ahead with the required accuracy.

Key words: electricity consumption forecasting, machine learning, decision trees, gradient boosting.

Gorshenin Alexey Yurievich, postgraduate, ayugorshenin@omgtu.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Gritsay Alexander Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, aleksandr.gritsay@gmail.com, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Denisova Lyudmila Albertovna, doctor of technical science, professor, denisova@asoiu.com, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 624.139
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-231-232

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДГОТОВКЕ ТЕРРИТОРИИ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ

Г.С. Ладышкин, А.В. Федоренко

В статье представлены результаты анализа грунтов на крайнем севере, при этом особое внимание уделено рассмотрению многолетнемерзлым грунтам. Предложены и рассмотрены особенности организации и проведения инженерной подготовки территорий с этими грунтами, на которых планируется строительство или проведение других земляных работ. Рассматриваются рекомендации по расчету их объема и проведению, с целью снижения стоимости работ и сохранению целостности мерзлого грунта в первозданном состоянии.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, инженерная подготовка территории.

В последнее время уделяется большое внимание развитию северных территорий. Суровые климатические условия и удалённость от центров с развитой инфраструктурой, сложности логистики являются лишь малой частью тех факторов, которые делают строительство на этих территориях особенным. Однако, современные технологии и материалы, а также новые подходы к организации процессов строительства позволяют достигать успеха в этой области. В целом, тенденции развития строительства на Крайнем Севере показывают, что это направление имеет потенциал для дальнейшего развития и роста. Однако, для успешной реализации проектов необходимо учитывать все особенности региона и применять подходы, которые бы максимально учитывали интересы всех заинтересованных сторон и экологические нормы.

На Крайнем Севере нашей страны интенсивно осваивают районы с многолетнемерзлыми грунтами. Одной из главных проблем, с которыми сталкиваются там строители, является суровый климат и особенности грунтовых условий. Инженерная подготовка территорий с такими грунтами сложна и проектируют ее с учетом условий, необычных для других районов.

Анализ территорий с многолетнемерзлыми грунтами. Многолетнемерзлыми грунтами называется толща промороженных грунтов, всегда имеющая отрицательную или нулевую температуру. Обычно температура грунта колеблется от 0°С до минус 7°С. В таком состоянии многолетнемерзлые грунты могут сохраняться неопределенно долгое время – до нескольких тысячелетий.

Многолетнемерзлые грунты, в некоторых источниках называемые криолитом, представляют собой взаимосвязанную четырехкомпонентную систему, состоящую из минеральных и газообразных частиц, замерзшей воды и льда, который цементирует минеральные частицы. Эти грунты могут сплошными, когда они сплошь залегают на всей территории и имеют вкрапления талых пород (таликов). Или прерывистыми, т.е. находиться в вечномерзлом состоянии только в виде отдельных линз (островная мерзлота).

Талики, как правило, расположены у южных границ распространения вечной мерзлоты. Талики находят и под водоемами и в местах выхода на поверхность грунтовых вод. Бывает, что их появление является следствием нарушения температурного режима в результате неконтролируемой или неправильной хозяйственной деятельности человека.

Толщу многолетнемерзлых грунтов по вертикали делят на три зоны, они показаны на рис. 1 [1,2]. *Деятельный слой* – первая, верхняя часть толщи. Она оттаивает летом и замерзает зимой. Ее мощность может колебаться от 0,2 до 4 м и зависит от интенсивности и продолжительности прогревания поверхности. На глубину деятельного слоя может оказывать влияние экспозиция и крутизна склонов неровностей рельефа, наличие растительности на поверхности грунта и ее характер, гранулометрический состав грунтов и степень их влажности и другие факторы.

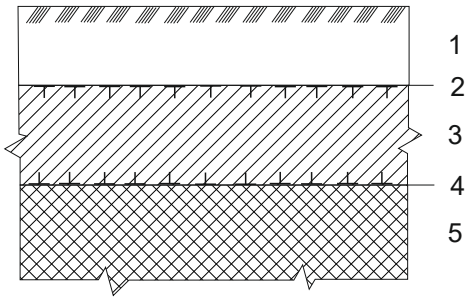


Рис. 1. Схема строения толщи многолетнемерзлых грунтов: 1 – деятельный слой; 2 – верхняя граница мерзлоты (ВГМ); 3 – многолетнемерзлый грунт; 4 – нижняя граница мерзлоты (НГМ); 5 – подмерзлотный слой

Криолитозона – это собственно многолетнемерзлые грунты, их мощность может достигать многих сотен метров, локальные изменения могут зависеть от крупных элементов рельефа. Верхняя граница криолитозоны (ВГМ) находится на глубине сезонного оттаивания грунтов, а расположение нижней (НТМ) обычно зависит от широты местности и активности геотермальных процессов в земной коре. По вертикали многолетнемерзлые грунты могут залегать сплошной толщей. Однако, в ней возможно существование подземных льдов. В случаях если грунтовые воды связаны с поверхностными или температура в глубине толщи близка к нулю, иногда могут встречаться прослойки талых пород.

Грунтовые воды в многолетнемерзлых грунтах имеют три горизонта. Их подразделяют на надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные, которые расположенны в соответствующих зонах толщи верхнего слоя земной коры.

Надмерзлотные воды размещаются в деятельном слое и питаются как правило за счет атмосферных осадков. Иногда источником надмерзлотных вод может быть оттаявший подземный лед или подмерзлотные водоносные пласты. Вода в этих пластах движется в сторону падения уровня водоупора, которым является многолетнемерзлые грунты, и попадает в деятельный слой через образующиеся талики.

Межмерзлотные грунтовые воды существуют, как правило, благодаря переносу теплоты при движении воды в криолитозону и их связи с нижележащим подмерзлотным водоносом.

Подмерзлотные воды циркулируют ниже многолетнемерзлых грунтов, имеют относительно постоянный напор и дебит, неизменный химический состав. Их часто используют для водоснабжения.

Грунтовые воды всех трех горизонтов взаимосвязаны, имеют сложный режим и оказывают влияние на устойчивость зданий и сооружений, находящихся на поверхности.

Один из решающих факторов, определяющий пригодность мерзлых грунтов в качестве оснований фундаментов, – это температура многолетнемерзлых грунтов. В зоне сплошного распространения последних она обычно ниже минус 5°С, у таликов меньше или равна минус 1,5 °С, а островной мерзлоты близка к 0°С. От температуры зависит прочность мерзлых пород и способность их восстанавливать исходное состояние после оттаивания в результате строительства. При этом поверхность мерзлого грунта оседает, а также величина его осадки зависит от глубины проникновения положительных температур, влажности грунта и передаваемых на него нагрузок. Предельно допустимую величину деформаций оттаявшего основания необходимо нормировать по условиям обеспечения устойчивости сооружений.

При инженерной подготовке местности необходимо использовать дорожно-мерзлотную классификацию грунтов, в основу которой положены два основных признака: относительное сжатия грунтов под нагрузкой δ (5) в зависимости от мощности их оттаивания и влажность грунтов в мерзлом состоянии. По этим признакам выделяют четыре категории грунтов: непросадочные, малопросадочные, просадочные и сильнопросадочные [1,2].

При освоении многолетнемерзлых грунтов для градостроительных нужд необходимо использовать два основных правила. Первое – это обязательное сохранение их в мерзлом состоянии (состояние мерзлого грунта [4]) в процессе строительства и эксплуатации. Второе правило заключается в допуске оттаивании грунтов на определенную расчетную глубину, заложенную при строительстве. При этом, в пределах каждой строительной площадки применяют хотя бы одно из этих правил, однако для крупных сооружений, имеющих большую линейную характеристику, допускается их сочетание двух правил.

Первое правило должно находить применение в случаях, когда разрабатываемые грунты застраиваемой территории можно сохранить в мерзлом состоянии при допустимых экономически оправданных затратах. Второе правило применимо при разработке и строительстве на скальных породах или грунтах, деформация оттаивания ко-

торых не превышает критических допустимых значений. Это правило целесообразно и при очаговом, несплошном распространении вечной мерзлоты, а также при неодинаковой глубине залегания ВГМ.

Особые природные условия районов распространения многолетнемерзлых грунтов диктуют специальные нормы и требования к строительству и эксплуатации сооружений, что и предопределяет особенности и сложности проектирования инженерной подготовки территорий, характер мероприятий которой будет зависеть от мерзлотно-геологических условий строительства. Эти условия в районах вечной мерзлоты во многом характеризуются наличием обширных областей с грунтами пониженной несущей способности, вследствие наличия подземных льдов или засоленных грунтов, включающих мерзлотно-геоморфологические образования, а в некоторых случаях и в результате активной сейсмической деятельности.

К мерзлотно-геоморфологическим образованиям на таких грунтах следует относить следующие возможные виды деформации поверхности: грунтовые наледи, бугры пучения, морозобойные трещины, термокарсты, солифлюкцию, оврагообразование и др.

Грунтовые наледи обычно возникают под напором надмерзлотных вод из-за уменьшения или промерзания сечения потока грунтовых вод. Также причиной образования наледей могут быть и подземные воды глубинных горизонтов, которые могут выходить по зонам разломов, тектоническим трещинам или контактам пород различного возраста и состава. В результате этого изливающаяся вода замерзает и образует на поверхности наледи. В некоторых случаях наледи могут появляться на участках, где движению потока грунтовых вод препятствует какая-либо преграда или в виде местного увеличения промерзания с поверхности или прослойки слабофильтрующих грунтов. Иногда появлению наледей способствует срезка, и выемка грунта на склонах в местах, где происходит разгрузка грунтовых вод или проведение отсыпки в летний период штабелей грунта. И на этот фактор следует обратить внимание при организации проведения земляных работ.

Иногда образование наледей может быть вызвано и особенностями режима водоемов. Таким образом образующиеся наледи называют речными или озерными. Они, как правило, отличаются крупными размерами по сравнению с грунтовыми.

Бугры пучения – это поднятие почвы под действием потока грунтовых вод, в которых имеются ледяные включения. С изменением теплового режима происходит разрушение бугров и образование впадин.

Морозобойные трещины возникают из-за неравномерного охлаждения грунтов в связи с развитием в них растягивающих напряжений, превышающих предел прочности мерзлого грунта на разрыв. Глубина растрескивания ограничивается обычно зоной сжатия грунтов и практически не превышает 10 м.

Термокарст – это провальные формы рельефа, образованные из-за оттаивания льдистых многолетнемерзлых грунтов и поверхностного льда вследствие изменения температурного и гидрогеологического режима. При этом провалы наполняет вода, и образуются озера глубиной до 1,5...3,0 м. Для термокарста характерно прогрессирующее интенсивное увеличение провалов, сопровождающееся оползанием грунта у берегов.

Солифлюкция – медленное вязкое течение переувлажненного и оттаявшего грунта по склону под влиянием силы тяжести. Это явление, как правило, значительно усиливается под действием выпадающих атмосферных осадков. В этом случае деятельная зона сплывает интенсивней, а растительный слой смещается по отношению к нему, двигаясь быстрее. Следует обратить внимание на то, что солифлюкационные явления могут переходить в оползневые с катастрофическими последствиями.

Оврагообразование на многолетнемерзлых грунтах вызывается разрывом проточных вод льдистых грунтов. В этих случаях процесс развивается очень интенсивно, так как лед, цементирующий грунтовые частицы, тает и легко уносится водой.

Особенности инженерной подготовки территорий с многолетнемерзлыми грунтами. В отличие от организации инженерной подготовки территории в обычных условиях, такой вид работ на территориях с многолетнемерзлыми грунтами имеет ряд особенностей, хотя при этом выполняются типовые общие мероприятия: вертикальная планировка и организация поверхностного стока. Главной особенностью является то, что их необходимо

Выполнять достаточно жесткие требования к температурному режиму грунтов, уровню надмерзлотных грунтовых вод, затопляемости территории, проведением комплекса мероприятий по борьбе с солифлюкацией, термокарстами, наледями.

Вертикальную планировку территории с многолетнемерзлыми грунтами, представленную на рис. 2, осуществляют на основе материалов разработанной и уточненной геокриологической карты, в которой отражается текущее состояние, характер залегания и физические свойства грунтов (влажность, льдистость и др.), рельеф местности, вид растительности, границы зон грунтов различной степени просадочности. Как уже было отмечено, их принято классифицировать как грунты: непросадочные, малопросадочные, просадочные и сильнопросадочные или грунты I, II, III и IV категорий, соответственно [1]. Кроме этой карты необходимо учесть основные правила возведения зданий и сооружений на рассматриваемых участках территории, с учетом их свойств и характеристик.

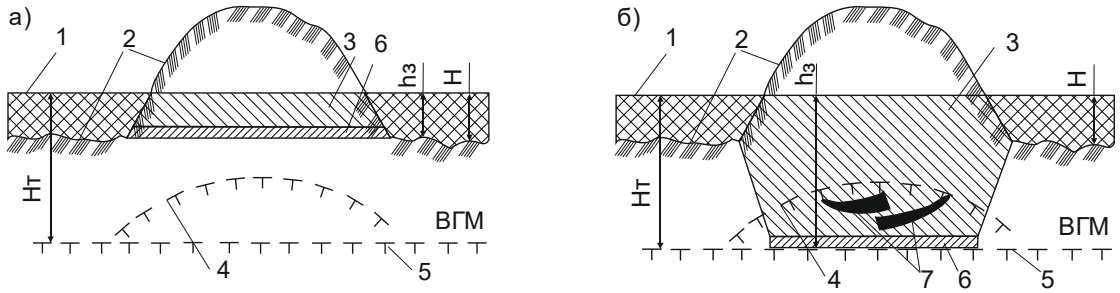


Рис. 2. Вертикальная планировка территории на просадочных (а) и сильнопросадочных (б) грунтах: 1 – проектная поверхность территории; 2 – поверхность естественного рельефа; 3 – грунт, подлежащий выемке и замене; 4 – существующая верхняя граница мерзлоты (ВГМ); 5 – ВГМ после планировочных работ; 6 – слой утеплителя; 7 – включения подземного льда

В случаях, когда грунты основания зданий и сооружений используют в мерзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации, на этих участках необходимо проектировать насыпи без нарушения растительного покрова. Срезку грунта допускается лишь на тех участках, где используют второе правило – оттаивание грунтов. Ограничение срезки необходимо применять на просадочных и сильнопросадочных грунтах III и IV категорий, при этом вертикальную планировку необходимо выполнять за счет подсыпки привозным грунтом.

На непросадочных и малопросадочных грунтах I и II категорий вертикальную планировку осуществляют обычными методами, в этих случаях можно допустить как подсыпку, так и срезку грунта. При этом излишки, которые образовались при срезке, можно использовать для организации вертикальной планировки осваиваемой территории.

Низшую планировочную отметку территории на грунтах III и IV категорий необходимо назначать из условия обеспечения минимально допустимой высоты подсыпки, согласно соотношению:

$$H \geq \delta H_T \tag{1}$$

где H – допустимая высота подсыпки, обеспечивающая ее устойчивость при осадке в результате оттаивания, м; δ – коэффициент, характеризующий относительное сжатие грунтов основания при оттаивании под нагрузкой, определяемое по справочным данным, [4]; H_T – глубина сезонного оттаивания грунта, используемого для подсыпки, берется по картам изолиний оттаивания грунтов, м.

Расчетная глубина сезонного оттаивания грунтов H_T определяется через нормативную величину $\mathrm{H_T^H}$ по формуле:

$$H_T = m_t^T H_T^H \tag{2}$$

где $\mathrm{m_t^T}$ – коэффициент теплового влияния, зданий и сооружений [4].

Планировочных отметки территории, как при срезке, так и подсыпке необходимо учитывать возможность уплотнения грунтов в результате их оттаивания. Разрабатываемые участки с грунтами III и IV категорий обычно подсыпают до планировочной отметки, используя непросадочный и малопросадочный материал I и II категорий, который остается при разработке в карьерах. Получить нулевой баланс при вертикальной планировке на таких участках нельзя. Также не всегда удается сбалансировать подсыпку со срезкой и на грунтах I и II категорий.

Изменение рельефа срезкой на территориях, состоящих из грунтов III и IV категорий, допускаются только при вертикальной планировке отдельных локальных участков с местными возвышениями (рис. 2). При этом объем грунта превышающий нулевой уровень и обозначенный на рис. 2 цифрой 3 подлежит изъятию, и этот объем заменяют грунтами I или II категории. Под нижний слой заменяемого грунта рекомендуется уложить слой утеплителя, в первую очередь это необходимо проделывать под зданиями или сооружениями, которые в ходе эксплуатации нагреваются. Это в дополнение со строительными мероприятиями [1] обеспечит сохранение слоя мерзлого грунта.

Объем заменяемого грунта определяют исходя из расчета глубины замены грунта $h_З$ при срезке локальных возвышений на участках с грунтами III категории:

$$h_З = H \tag{3}$$

При этом, в грунтах IV категории глубину замены грунта принимают равной мощности деятельного слоя:

$$h_З = H_T \tag{4}$$

Особое внимание необходимо уделить формированию и прокладке городских улиц. Их проектируют в уровне красных отметок планировки, при этом применяют традиционное решение, представленное на рис. 3а, или в варианте, когда дорогу приподнимают на насыпях (рис. 3б). Последнее решение позволяет максимально сохранить температурный режим грунтов и растительный покров и рекомендуется применять для городских районов нового строительства и на залесенных территориях со сплошным распространением вечномерзлых грунтов. Особое внимание, при реализации этого решения, необходимо уделить обеспечению устойчивости насыпи, проектируя ее определенной (оптимальной) высоты $H_{ОП}$.

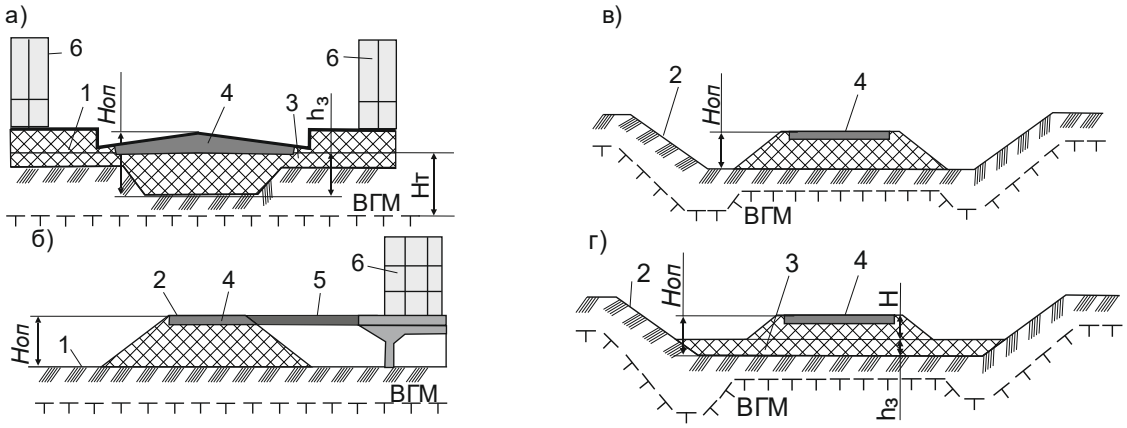


Рис. 3. Городские магистрали на вечномерзлых грунтах: а – в уровне красных отметок планировки; б – на насыпи; в, г – в выемке (г – с заменой грунта на дне выемки); 1 – отметка существующего рельефа; 2 – проектная отметка планировки; 3 – грунт, подлежащий замене; 4 – дорожная одежда; 5 – подъезд к жилому комплексу; 6 – застройка

Расчет оптимальной высоты насыпи $H_{ОП}$ производят исходя из необходимости сохранения мощности природной толщи деятельного слоя и обеспечения осадки земляного полотна в оттаявшее основание в пределах нормативных величин. Ее определяют по исходя из требований:

$$H_{ОП} = H_{Н} - \frac{H_{Н} S}{H_{Т}(1/\delta - 1) - S} \quad (5)$$

где $H_Н$ – глубина сезонного оттаивания конструкции насыпи, м; S – расчетная осадка насыпи, м; $H_Т$ – глубина сезонного оттаивания грунта, используемого для подсыпки, определяется по картам изолиний оттаивания грунтов, м.

Расчетную осадку насыпи в зависимости от типа конструкции одежды определяются по справочным данным, [3]. При этом необходимо учесть, что для грунтов основания, относящихся к IV категории, осадку насыпи не допускают и на этих таких основаниях оптимальную высоту насыпи необходимо принимать равной глубине сезонного оттаивания грунта, который используется для подсыпки.

При расчете оптимальной высоты насыпи автомобильных дорог и городских улиц с «темным» покрытием (асфальтобетон и др.) в формулу (5) вводят поправочный коэффициент $r_{алб}$, за счет которого учитывается альбедо поверхности, т. е. отношение количества энергии, отраженной ею, ко всей лучистой энергии, падающей на дорогу от солнца.

Поправку на экспозицию склонов $r_Э$ для участков дорог, которые проходят по южной стороне возвышенности, необходимо вводить при проектировании в горных районах. При этом, оптимальная высота насыпи рассчитывается по формуле (все обозначения соответствуют формуле 5):

$$H_{ОП} = r_{АЛБ}(или\ r_Э) H_{Н} - \frac{H_{Н} S}{H_{Т}(1/\delta - 1) - S} \quad (6)$$

Поправочные коэффициенты $r_Э$ и $r_{алб}$ обычно принимают по справочным источникам [4].

В районах с частыми метелями, рассчитанные по формулы (5) и (6) оптимальной высоты насыпи необходимо сопоставить с высотой, которая будет гарантировать защиту проектируемых объектов от снежных заносов. При этом величину проектной высоту насыпи необходимо увеличить на предполагаемую толщину заносов.

В случаях, когда продольный профиль дороги невозможно запроектировать с насыпью расчетной высотой $H_{ОП}$, ее сооружают меньшей высоты, но с заменой грунта в основании. При этом расчетные глубина замены грунта $r_З$ и высота надземной части насыпи H должны в сумме составлять величину $H_{ОП}$. В этих случаях и на нулевых местах глубина замены грунта в основании дорожной одежды:

$$h_З = H_{ОП} - H \quad (7)$$

При проектировании улиц и дорог в выемках устойчивость дорожной одежды обеспечивают за счет разработки выемки и устройства в ней насыпи по рис. 3в. Грунт на дне выемки можно заменить на глубину, определяемую по формуле (7) и при этом проектируют конструкцию, показанную на рис. 3*г*.

Устойчивость откосов обеспечивают расчетным небольшим углом заложения (α), в некоторых случаях, при необходимости, покрытием слоем теплоизоляционного материала, предохраняющего грунт от прогрева в летний период. Крутизна проектируемого откоса рассчитывается по формуле:

$$\sin \alpha < [\tau_{СД} / (\rho H_{\tau})] \quad (8)$$

где α – угол откоса по отношению к горизонтальной поверхности, град; ρ – плотность мерзлого грунта откоса, кг/ м^3; $\tau_{СД}$ – сопротивление грунта сдвигу, соответствующее началу возникновения пластических деформаций, Па.

$$\tau_{СД} = c + p\, tg\varphi \quad (9)$$

где c – силы сцепления мерзлого грунта после его оттаивания, Па; φ – угол внутреннего трения грунта; p – Давление оттаявшего слоя грунта, Па.

$$p = H_{Т} \rho . \quad (10)$$

Значение угла внутреннего трения и сцепления мерзлого грунта принимают по данным мерзлотно-грунтовых изысканий или справочной литературы [4].

Высотное положение проездов на межмагистральных территориях, стоянок для автомобилей и других площадок задают обычно в уровне красных отметок планировки. Грунт в их основании заменяют на расчетную глубину, кроме пешеходных дорожек, которые могут быть устроены на небольшой насыпи (рис. 4) высотой $H_{ОП}$ = 0,5–0,7 м. Если же их совмещают с каналами для подземных сетей, то глубину замены грунта определяют специальным расчетом.

Поверхностный сток в районах многолетнемерзлые грунтов необходимо организовывать с использованием неполной раздельной системы канализации. Как правило, для городов, расположенных на крайнем севере, проектируют и общесплавную систему канализации, однако ее эксплуатация требует дополнительных расходов, связанных с необходимостью в дополнительной теплоизоляции труб и подогреве сточных вод.

Лотки и канавы, врезаемые в грунт, должны иметь поперечный профиль трапеции с пологими укрепленными склонами. Многолетнемерзлые грунты легко размываются, поэтому крепление лотков необходимо выполнять железобетонными и армоцементными плитами или профилированными сборными блоками. При этом, элементы крепления необходимо укладывать на теплоизоляционный слой и по нему устроить надежную гидроизоляцию.

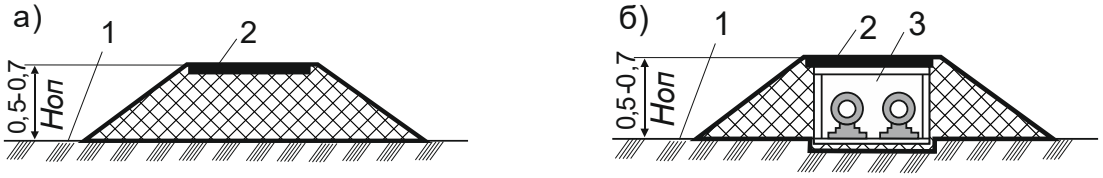


Рис. 4. Пешеходные дорожки: а – на насыпи; б – на насыпи, совмещенной с трассой подземных коммуникаций; 1 – отметка существующего рельефа; 2 – проектная отметка насыпи; 3 – коллектор

Специальные водоотводящие элементы необходимо проектировать в виде валов с укрепленными откосами или лотков, опирающихся на сваи и приподнятых над поверхностью земли. При этом, сваю конструкции необходимо вмораживать в толщу грунта на глубину, исключающую ее выдавливание силами пучения при замерзании.

Область применения той или иной конструкции водоотводящих элементов открытой системы водоотвода зависит от категории грунтов. Врезанные лотки и канавы необходимо использовать на грунтах I–II категорий и на подсыпанных участках с грунтами III и IV категорий. В случаях, если грунты льдонасыщенные (IV категории) необходимо предусмотреть меры по предотвращению образования наледей. Также необходимо предусмотреть конструктивные решения, обеспечивающие гидротермический режим оснований и откосов водоотводных канав, определенные в соответствии с теплотехническим расчетом. На участках территории с грунтами III и IV категорий, но без подсыпки водоотвод может быть организован с помощью земляных валов и лотков на сваях.

Параметры элементов открытой системы, продольные уклоны трасс необходимо определять с учетом требований руководящих документов [4]. Дождевые воды из отдельных местных понижений удалять по трубам в лотки водосточной сети. При этом, на грунтах, используемых для строительства с сохранением вечномерзлого состояния, нежелательно делать сосредоточенный сброс поверхностных вод в пониженные места рельефа. Особенно сложна организация поверхностного стока на плоском рельефе или с уклоном менее 5%, где в ряде случаев возникает необходимость устройства автоматических станций перекачки малой мощности.

При освоении территории с сохранением грунта в мерзлом состоянии в процессе строительства и эксплуатации дождевую канализацию необходимо размещать от зданий на расстоянии, определяемом расчетом. В расчет необходимо принимать условия, обеспечивающие сохранение мерзлого состояния грунтов оснований соседних сооружений.

Водоотводные системы необходимо проектировать, с учетом обеспечения максимального нарушения сложившихся мерзлотных условий. На участках с грунтовыми водами водоотводные элементы необходимо разрабатывать в комплексе с устройствами, предотвращающими наледи. Сброс загрязненных ливневых вод, необходимо предварительно очищать, при этом степень очистки определяют с учетом снижения эффективности самоочищения водоемов под влиянием низких температур.

Заключение. В заключение отметим, что стоимость строительства в отдаленных районах Крайнего Севера в несколько раз выше, чем в центральной полосе России. Затраты на инженерную подготовку территории еще выше. Это обусловлено отдаленностью и низкой освоенностью территорий, суровыми и сложными климатическими и природными условиями, отсутствием развитых баз материально-технического снабжения.

Поэтому предварительная подготовка мероприятий и адекватный расчет, с использованием существующих методик и предварительных рекомендаций, в т.ч. изложенных в статье, позволяет точно определить перечень необходимых работ в районах крайнего севера. В целом это должно привести к снижению стоимости организации и проведения строительства, оптимизации объема планируемых работ, а также, что особенно важно, в сохранении экологической устойчивости природного комплекса этого уникального района Земли [1].

Список литературы

1. Полуй Б.М. Архитектура и градостроительство в суровом климате: учебное пособие. Л.: Стройиздат. Ленинградское отделение, 1989. 300 с.
2. Владимиров В.В. Инженерная подготовка и благоустройство городских территорий: учебник. М: Архитектура-С, 2004. 240 с.
3. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 41 с.
4. СП 25.13330.2020. «СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». М., 2020.

Ладышкин Григорий Сергеевич, канд. техн. наук, преподаватель, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Федоренко Андрей Владимирович, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

RECOMMENDATIONS FOR ENGIMEERING PREPARANION OF THE TERRITORY WITH PERMAFROST SOILS

G.S. Ladyshkin, A.V. Fedorenko

The article presents the results of soil analysis in the far north, with special attention paid to the consideration of permafrost soils. The features of the organization and conduct of engineering preparation of territories with these soils, on which construction or other earthworks are planned, are proposed and considered. Recommendations on the calculation of their volume and implementation are considered, in order to reduce the cost of work and preserve the integrity of frozen soil in its original state.

Key words: permafrost soils, engineering preparation of the territory.

Ladyshkin Grigoriy Sergeevich, candidate of technical sciences, lecturer, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Mozhaisky Military Aerospace Academy,

Fedorenko Andrey Vladimirovich, candidate of technical sciences, deputy head of the department, Russia, Saint-Petersburg, Mozhaisky Military Aerospace Academy

УДК 519.27
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-237-238

АЛГОРИТМ ОПЕРАТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ МОМЕНТА ИЗМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ ПРОЦЕССА АВТОРЕГРЕССИИ 1-ГО ПОРЯДКА

Г.Ф. Филаретов, Цинь Юйдэ

Работа посвящена задаче построения контролирующего алгоритма, предназначенного для оперативного обнаружения изменения вероятностных свойств (разладки) процесса авторегрессии 1–го порядка, когда разладка связана со скачкообразным изменением его математического ожидания. Для решения данной задачи предлагается использовать алгоритм скользящего среднего или МА-алгоритм (MA -Moving Average). С помощью метода имитационного моделирования получена справочная информация, позволяющая синтезировать контролирующий МА-алгоритм с заданными свойствами и оценить степень влияния коррелированности значений временно́го ряда на эти свойства.

Ключевые слова: обнаружение разладки по математическому ожиданию; алгоритм скользящего среднего; процесс авторегрессии 1-го порядка.

Алгоритм скользящего среднего (МА-алгоритм) относится к категории последовательных параметрических алгоритмов обнаружения разладки случайных процессов, каждый из которых функционирует в рамках единой схемы [1 - 3]: в реальном масштабе времени, т.е. в ритме с поступлением текущего значения контролируемого процесса x_i осуществляется расчет очередного значения решающей функции МА-алгоритма g_i, которая в данном случае равна $g_i = (x_i+x_{i-1}+\ldots+x_{i-N})\ /N$, где N - ширина окна усреднения, с последующим ее сопоставлением с заранее установленным решающим порогом h.

Если окажется, что $g_i < h$, процедура контроля продолжается; в противном случае, если $g_i \geq h$, подается сигнал о наличии разладки (сигнал тревоги), и процедура контроля приостанавливается до выяснения причин возникновения подобной ситуации. Очень важно, чтобы алгоритм обнаружения обладал некоторыми оптимальными свойствами – например, в смысле минимизации среднего времени запаздывания в обнаружении разладки $\overline{\tau}_{\text{зап}}$ при фиксированном среднем интервале между ложными тревогами $\overline{T}_{\text{лт}}$.

В принципе МА-алгоритм известен уже давно, фактически начиная с первых работ в этой области, наряду с такими популярными алгоритмами как алгоритм кумулятивных сумм (CUSUM-алгоритм) или алгоритм экспоненциального взвешенного скользящего среднего (EWMA-алгоритм) [4,5]. Однако свойства МА-алгоритма, его возможности и эффективность по сравнению с другими алгоритмами обнаружения разладки до последнего времени были изучены весьма слабо. Лишь совсем недавно статистические свойства МА-алгоритма при решении задачи обнаружения разладки процесса по математическому ожиданию были изучены с необходимой для практического использования полнотой [6]. В частности, было показано, что МА-алгоритм по своей эффективности в целом лишь незначительно уступает наиболее эффективному CUSUM-алгоритму, а в некоторых вариантах даже его превосходит.

Следует отметить, что в указанном исследовании, как и в большинстве аналогичных, в качестве одной из основных предпосылок использовалось предположение о том, что наблюдаемые дискретные значения x_i контролируемого процесса являются *некоррелированными*. Это существенно ограничивает область практического применения получаемых результатов. К сожалению, работ, связанных с изучением влияния коррелированности значений x_i на свойства алгоритмов обнаружения разладки, относительно мало [7 - 9]. Именно поэтому данное направление исследований представляется весьма актуальным и перспективным.

Постановка задачи исследования. *Целью данной работы* является всестороннее исследование характеристик МА-алгоритма наискорейшего обнаружения момента изменения математического ожидания, если контролируемый процесс является гауссовским процессом авторегрессии 1-го порядка АР(1), т.е. когда его значения x_i определятся соотношением:

$$x_i = \alpha\, x_{i-1} + \varepsilon_i\ ,\quad i = 1, 2, \ldots \qquad (1)$$

где α – параметр авторегрессии, определяющий степень коррелированности значений x_i , ε_i – некоррелированные гауссовские случайные числа с единичной дисперсией. Нормированная автокорреляционная функция такого процесса равна $\rho_{XX}(k) = \alpha^k$, $k = 1, 2, \ldots$, а дисперсия $\sigma_X^2 = (1 - \alpha^2)^{-1}$.

Метод исследования - имитационное моделирование, в рамках которого осуществляется L – кратное повторение работы МА-алгоритма при различных комбинациях значений решающего порога h , ширины окна усреднения N, параметра α процесса АР(1) и величины относительного изменения (разладки) математического ожидания $\delta = |m_1 - m_0|/\sigma_X$. Здесь m_0 - значение математического ожидания контролируемого процесса при отсутствии разладки, а $m_1 \neq m_0$ - при ее появлении.

Первоочередной целью имитационного моделирования является получение набора справочных данных, позволяющих в конечном итоге осуществлять синтез контролирующего алгоритма с учетом конкретных технических требований, предъявляемых пользователем. Для практического проведения такого синтеза должны быть предварительно получены зависимости вида $h = \varphi(\overline{T}_{\text{лт}})$ и $\overline{\tau}_{\text{зап}} = \psi(\overline{T}_{\text{лт}})$, учитывающие также и влияние всех перечисленных выше параметров: N, δ , α .

Имитационные эксперименты проводились с помощью специально разработанной базовой компьютерной программы, позволяющей при задании определенных значений h, N и α, найти величину $\overline{T}_{\text{лт}}$, если выбрать $\delta = 0$, или $\overline{\tau}_{\text{зап}}$, если установить $\delta > 0$.

План проведение экспериментальных работ предусматривал последовательное решение трех основных задач:

- определение значений решающего порога h ;
- оценка быстродействия МА-алгоритма в условиях коррелированности наблюдений контролируемого случайного процесса;
- анализ эффективности различных вариантов МА-алгоритма и оценка влияния на неё корреляционной характеристики α.

Определение значений решающего порога *h*. Решение данной задачи является весьма трудоемким. Это связано прежде всего с тем, что базовая компьютерная программа имитационного моделирования позволяет для заданного значения порога h и других параметров алгоритма найти $\overline{T}_{ЛТ}$, в то время как здесь должна быть решена по сути обратная задача: для заданного $\overline{T}_{ЛТ}$ определить h. Поэтому в данном случае базовую программу пришлось дополнить специальным программным модулем, реализующим процедуру одномерного поиска, с помощью которого после ряда итераций и определялось значение h.

Второе обстоятельство, осложняющее получение искомого решения, это большое число комбинаций факторов, которые приходится рассматривать при проведении исследований. План проведения имитационного эксперимента включал в себя следующий набор их значений:

- средний интервал между ложными тревогами $\overline{T}_{ЛТ}$: 100; 250; 500; 1000;
- ширина окна усреднения N решающей функции: 1; 2; 3;…; 16;
- параметр корреляционной характеристики α : 0,1 – 0,9 с шагом 0,2; дополнительно α = 0,8 и α = 0 (отсутствие коррелированности);
- величина разладки δ : 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0, а также δ = 0 – отсутствие разладки.

Наконец, третье обстоятельство: необходимость получения высокой точности результатов имитационных экспериментов, что требует большого числа повторных опытов L в каждом эксперименте: $L = 10^5 - 10^6$.

В целом, весь процесс имитационного моделирования оказывается весьма громоздким, требующим при решении данной задачи больших усилий со стороны экспериментатора. Тем не менее, в конечном итоге для перечисленных выше значений $\overline{T}_{ЛТ}$ были получены зависимости порога h от N при различных α.

В качестве примера для $\overline{T}_{ЛТ}$ = 100 такого рода зависимости представлены далее в табличной (табл. 1) и графической (рис. 1) форме.

Таблица 1

Значения порога h для $\overline{T}_{ЛТ}$ =100

α \ N	1	2	4	8	16
0	2,326	2,278	2,156	1,952	1,667
0,1	2,324	2,273	2,138	1,930	1,640
0,3	2,305	2,230	2,071	1,853	1,559
0,5	2,257	2,162	2,000	1,773	1,474
0,7	2,144	2,044	1,871	1,659	1,359
0,8	2,017	1,912	1,765	1,561	1,276
0,9	1,740	1,643	1,525	1,353	1,105

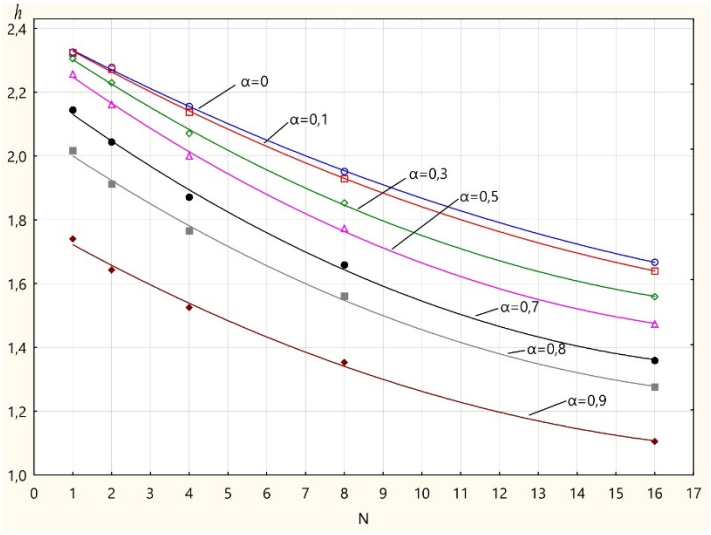


Рис. 1. Зависимость порога h от N и α для $\overline{T}_{ЛТ}$ =100

На рис. 1, кроме экспериментальных точек, нанесены и аппроксимирующие кривые в виде квадратичного полинома, полученные с помощью регрессионного анализа. Аналогичные аппроксимирующие кривые найдены и для других значений $\overline{T}_{ЛТ}$. Полные сведения о полученных зависимостях представлены в табл. 2.

Для вынесения суждения о точности полученных зависимостей для всех вариантов определялась величина коэффициента детерминации R^2, суммарно оценивающего предсказательные возможности полученной аппрок-

симационной модели [10]. Она оказалась очень высокой: $R^2 \geq 0{,}996$. Это позволяет при необходимости определять величину порога h для любых N в диапазоне от 1 до 16.

Таблица 2

Зависимости решающего порога h от N для различных α и $\overline{T}_{ЛТ}$

α	$\overline{T}_{ЛТ}$ **= 100**	$\overline{T}_{ЛТ}$ **= 500**
0	$h = 2{,}3956 - 0{,}0648\,N + 0{,}0012\,N^2$	$h = 2{,}9252 - 0{,}0395\,N + 0{,}0006\,N^2$
0,1	$h = 2{,}3977 - 0{,}0696\,N + 0{,}0014\,N^2$	$h = 2{,}9275 - 0{,}0425\,N + 0{,}0007\,N^2$
0,3	$h = 2{,}3837 - 0{,}0829\,N + 0{,}0020\,N^2$	$h = 2{,}9258 - 0{,}0559\,N + 0{,}0014\,N^2$
0,5	$h = 2{,}3350 - 0{,}0892\,N + 0{,}0022\,N^2$	$h = 2{,}9049 - 0{,}0634\,N + 0{,}0017\,N^2$
0,7	$h = 2{,}2187 - 0{,}0903\,N + 0{,}0023\,N^2$	$h = 2{,}8451 - 0{,}0686\,N + 0{,}0019\,N^2$
0,8	$h = 2{,}0816 - 0{,}0833\,N + 0{,}0021\,N^2$	$h = 2{,}7645 - 0{,}0684\,N + 0{,}0019\,N^2$
0,9	$h = 1{,}7902 - 0{,}0697\,N + 0{,}0017\,N^2$	$h = 2{,}5733 - 0{,}0590\,N + 0{,}0016\,N^2$
α	$\overline{T}_{ЛТ}$ **= 250**	$\overline{T}_{ЛТ}$ **= 1000**
0	$h = 2{,}7056 - 0{,}0480\,N + 0{,}0008\,N^2$	$h = 3{,}1286 - 0{,}0318\,N + 0{,}0004\,N^2$
0,1	$h = 2{,}7081 - 0{,}0521\,N + 0{,}0010\,N^2$	$h = 3{,}1310 - 0{,}0343\,N + 0{,}0005\,N^2$
0,3	$h = 2{,}7060 - 0{,}0667\,N + 0{,}0017\,N^2$	$h = 3{,}1379 - 0{,}0491\,N + 0{,}0012\,N^2$
0,5	$h = 2{,}6752 - 0{,}0734\,N + 0{,}0019\,N^2$	$h = 3{,}1194 - 0{,}0551\,N + 0{,}0014\,N^2$
0,7	$h = 2{,}5936 - 0{,}0761\,N + 0{,}0020\,N^2$	$h = 3{,}0743 - 0{,}0618\,N + 0{,}0017\,N^2$
0,8	$h = 2{,}4941 - 0{,}0740\,N + 0{,}0020\,N^2$	$h = 3{,}0036 - 0{,}0612\,N + 0{,}0017\,N^2$
0,9	$h = 2{,}2656 - 0{,}0629\,N + 0{,}0016\,N^2$	$h = 2{,}8457 - 0{,}0558\,N + 0{,}0016\,N^2$

Оценка быстродействия МА-алгоритма. Для оценки быстродействия рассматриваемого алгоритма необходимо найти зависимости среднего времени запаздывания в обнаружении разладки $\overline{\tau}_{зап}$ от показателя величины разладки δ и ширины окна усреднения N для всех возможных комбинаций значений $\overline{T}_{ЛТ}$ и α . Всего таких комбинаций насчитывается 28.

Наиболее удобной формой представления результатов здесь является табличная форма. В табл. 3 в качестве типичного примера приведена одна из этих 28 таблиц.

Таблица 3

Значения $\overline{\tau}_{зап}$ ***как функции от N и δ при*** $\overline{T}_{ЛТ}$ ***= 250, α=0,3***

N	δ = 0,5	δ = 1,0	δ = 1,5	δ = 2,0	δ = 2,5	δ = 3,0
1	67,3	23,2	10,1	5,43	3,44	**2,44**
2	55,7	17,9	7,99	4,58	**3,14**	2,45
3	48,5	15,5	7,12	**4,39**	3,23	2,69
4	44,5	14,1	6,83	4,43	3,46	2,96
5	42,1	13,3	**6,72**	4,60	3,70	3,20
6	39,3	12,7	6,74	4,79	3,93	3,41
7	37,2	12,3	6,84	5,00	4,15	3,60
8	35,8	12,2	6,97	5,23	4,34	3,76
9	34,2	11,2	7,11	5,41	4,50	3,89
10	33,3	11,9	7,301	5,606	4,65	4,02
11	32,2	**11,8**	7,47	5,77	4,79	4,14
12	31,4	11,9	7,62	5,917	4,90	4,23
13	31,0	12,0	7,81	6,06	5,02	4,34
14	30,93	12,2	8,04	6,24	5,16	4,45
15	**30,89**	12,4	8,26	6,40	5,297	4,56
16	30,97	12,6	8,43	6,55	5,42	4,65

Анализ данных табл. 3 показывает, что для определенной комбинации значений α и $\overline{T}_{ЛТ}$ существует такое N, при котором среднее время запаздывания $\overline{\tau}_{зап}$ в обнаружении разладки δ минимально. В табл. 3 эти значения N для различных δ выделены полужирным шрифтом. Их можно назвать оптимальными в смысле обеспечения наибольшего быстродействия алгоритма обнаружения разладки. Наличие такого рода оптимальных значений N_{opt} подтверждается и данными, содержащимися во всех остальных таблицах.

Полная информация о выделенных оптимальных значениях N_{opt} для различных $\overline{T}_{ЛТ}$, α и δ приведена в табл. 4.

Далее варианты МА-алгоритмов, синтезированных с использованием значений N_{opt}, будем называть оптимизированными. Именно свойства таких алгоритмов, обеспечивающих наиболее быстрое обнаружение разладки, будут рассматриваться далее.

Анализ эффективности оптимизированых МА-алгоритмов. Для проведения подобного анализа, а также для установления степени влияния характеристики коррелированности наблюдений α на свойства МА-алгоритма удобно использовать показатели эффективности оптимизированных алгоритмов $E_{opt} = \overline{T}_{ЛТ} / \overline{\tau}_{зап}$.

Соответствующие данные о значениях E_{opt} для различных комбинаций $\overline{T}_{ЛТ}$, α и δ приведены в табл. 5.

Таблица 4

Значения N_{opt} в зависимости от δ и α для различных $\overline{T}_{ЛТ}$

$\overline{T}_{ЛТ}$ = 100							$\overline{T}_{ЛТ}$ = 250						
α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	15	6	3	2	1	1	**0**	15	6	4	2	2	1
0,1	13	6	3	2	1	1	**0,1**	16	8	4	3	2	1
0,3	13	7	4	2	2	1	**0,3**	15	11	5	3	2	1
0,5	13	11	4	2	2	1	**0,5**	15	11	7	4	2	2
0,7	13	12	4	2	1	1	**0,7**	15	13	9	5	2	1
0,8	12	12	11	4	2	1	**0,8**	12	12	11	4	2	1
0,9	13	13	10	2	1	1	**0,9**	13	13	10	2	1	1
$\overline{T}_{ЛТ}$ = 500							$\overline{T}_{ЛТ}$ = 1000						
α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	16	8	4	3	2	1	**0**	16	10	5	4	2	2
0,1	16	10	5	3	2	2	**0,1**	16	12	6	4	3	2
0,3	16	13	7	4	3	2	**0,3**	16	13	9	5	3	2
0,5	16	16	8	5	3	2	**0,5**	16	16	11	7	3	3
0,7	15	14	13	9	4	2	**0,7**	16	16	13	9	5	2
0,8	14	14	13	10	4	1	**0,8**	16	16	16	11	7	2
0,9	13	13	13	10	1	1	**0,9**	13	13	13	12	10	1

Таблица 5

Значения показателя эффективности E_{opt} в зависимости от δ и α для различных $\overline{T}_{ЛТ}$

$\overline{T}_{ЛТ}$ = 100							$\overline{T}_{ЛТ}$ = 250						
α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	7,4	16,9	29,1	44,8	56,8	75,0	**0**	12,9	32,6	58,5	87,5	120	159
0,1	6,5	14,9	25,6	37,9	50,1	66,8	**0,1**	11,2	28,6	50,8	77,3	106	138
0,3	5,2	11,4	19,2	28,5	38,5	50,9	**0,3**	8,1	21,1	37,2	57,0	79,5	102
0,5	3,9	8,3	13,9	20,7	28,3	36,6	**0,5**	5,9	14,9	26,0	39,9	56,1	73,4
0,7	3,0	5,9	9,5	13,9	18,9	24,1	**0,7**	4,2	9,9	16,8	25,3	35,6	46,8
0,8	2,6	4,7	7,4	10,7	14,3	18,1	**0,8**	3,4	7,6	12,7	18,8	26,2	34,1
0,9	2,1	3,5	5,2	7,2	9,4	11,5	**0,9**	2,7	5,2	8,3	11,9	16,2	20,6
$\overline{T}_{ЛТ}$ = 500							$\overline{T}_{ЛТ}$ = 1000						
α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	19,8	55,2	101	156	218	273	**0**	30,5	95,4	179	273	392	499
0,1	16,8	47,5	87,5	136	190	240	**0,1**	25,3	81,1	153	240	336	444
0,3	11,7	34,8	63,1	98,4	138	184	**0,3**	16,7	58,7	109	172	248	329
0,5	8,0	23,6	43,2	67,1	96,6	128	**0,5**	10,9	38,7	74,3	117	167	226
0,7	5,3	14,8	27,3	41,4	59,4	79,6	**0,7**	6,8	22,3	45,5	71,0	102	136
0,8	4,3	10,8	20,1	30,3	42,7	56,7	**0,8**	5,1	15,4	31,6	50,9	71,5	96,6
0,9	3,2	7,0	12,3	18,3	25,5	33,4	**0,9**	3,7	9,4	18,4	29,2	41,3	55,4

Анализируя представленные в табл. 5 данные, можно убедиться, что при увеличении значений $\overline{T}_{ЛТ}$ или величины разладки δ эффективность МА-алгоритма увеличивается. И наоборот, с ростом коррелированности значений контролируемого временно́го ряда, т.е. с ростом α , эффективность МА-алгоритма существенно снижается. Конечно, это можно было предвидеть, поскольку с ростом коррелированности информативность каждого отдельного значения временно́го ряда падает.

Количественный анализ степени влияния коррелированности отсчетов временно́го ряда на оптимизированные МА-алгоритмы обнаружения проведен с использованием показателя относительной эффективности $\mathbf{Є}(\alpha) = E_{opt}(0)/E_{opt}(\alpha)$, где $E_{opt}(0)$ – значение показателя E_{opt} в отсутствии корреляции, а $E_{opt}(\alpha)$ – при ее наличии ($\alpha > 0$). Величины $\mathbf{Є}(\alpha)$ для различных $\overline{T}_{ЛТ}$, δ и α указаны в табл. 6.

Данные, приведенные в табл. 6, свидетельствуют о том, коррелированность значений контролируемого временно́го ряда весьма значительно уменьшает эффективность МА-алгоритма по сравнению с вариантом некоррелированных отсчетов. При этом с ростом $\overline{T}_{ЛТ}$ такое уменьшение эффективности проявляется всё сильнее. Более четко эта тенденция обнаруживается с помощью данных табл. 7, где для различных $\overline{T}_{ЛТ}$ указаны значения показателей относительной эффективности $\mathbf{Є}(\alpha)$, усредненные по всем δ .

Таблица 6

Значения показателя относительной эффективности **Є**(α)
в зависимости от δ и α для различных $\overline{T}_{ЛТ}$

$\overline{T}_{ЛТ}$ = 100							$\overline{T}_{ЛТ}$ = 250						
α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	1	1	1	1	1	1	**0**	1	1	1	1	1	1
0,1	0,88	0,88	0,88	0,84	0,88	0,89	**0,1**	0,87	0,88	0,87	0,88	0,89	0,87
0,3	0,70	0,67	0,66	0,64	0,68	0,68	**0,3**	0,63	0,65	0,64	0,65	0,66	0,64
0,5	0,53	0,49	0,48	0,46	0,50	0,49	**0,5**	0,46	0,46	0,45	0,46	0,47	0,46
0,7	0,41	0,35	0,33	0,31	0,33	0,32	**0,7**	0,33	0,30	0,29	0,29	0,30	0,29
0,8	0,35	0,28	0,26	0,24	0,25	0,24	**0,8**	0,27	0,23	0,22	0,21	0,22	0,21
0,9	0,28	0,21	0,18	0,16	0,16	0,15	**0,9**	0,21	0,16	0,14	0,14	0,13	0,13
$\overline{T}_{ЛТ}$ = 500							$\overline{T}_{ЛТ}$ = 1000						
α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	α \ δ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	1	1	1	1	1	1	**0**	1	1	1	1	1	1
0,1	0,85	0,86	0,87	0,87	0,87	0,88	**0,1**	0,83	0,85	0,86	0,88	0,86	0,89
0,3	0,59	0,63	0,62	0,63	0,64	0,67	**0,3**	0,55	0,62	0,61	0,63	0,63	0,66
0,5	0,41	0,43	0,43	0,43	0,44	0,47	**0,5**	0,36	0,41	0,42	0,43	0,43	0,45
0,7	0,27	0,27	0,27	0,26	0,27	0,29	**0,7**	0,22	0,23	0,25	0,26	0,26	0,27
0,8	0,21	0,20	0,20	0,19	0,20	0,21	**0,8**	0,17	0,16	0,18	0,19	0,18	0,19
0,9	0,16	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	**0,9**	0,12	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11

Таблица 7

Средние значения показателей относительной эффективности **Є**(α)

α \ $\overline{T}_{ЛТ}$	100	250	500	1000	$\overline{Є}$
0,1	87,7	87,5	86,7	86,0	87
0,3	67,1	64,5	63,0	61,6	64
0,5	49,2	45,8	43,4	41,5	45
0,7	34,1	30,0	27,2	25,0	29
0,8	26,9	22,7	20,1	17,8	22
0,9	19,2	15,1	12,7	10,8	14

В последнем столбце табл. 7 указаны значения показателей относительной эффективности **Є**(α), усредненные ещё и по всем $\overline{T}_{ЛТ}$,что позволяет интегрально оценить потери эффективности МА-алгоритма в зависимости от характеристики коррелированности наблюдений α.

Выводы. Рассмотрена задача построения алгоритма скользящего среднего (МА-алгоритма), предназначенного для обнаружения спонтанного изменения (разладки) гауссовского процесса авторегрессии 1-го порядка. Методом имитационного моделирования проведено полномасштабное исследование его статистических характеристик. Показано, что МА-алгоритм может быть оптимизирован путем надлежащего выбора ширины скользящего окна усреднения *N*, обеспечивающего минимальную задержку в обнаружении разладки для фиксированного значения интервала между ложными тревогами, заданной величины разладки δ и определенного значения показателя коррелированности наблюдений α. Установлено, что эффективность оптимизированного алгоритма обнаружения разладки при наличии корреляции существенно уменьшается по сравнению с вариантом некоррелированных отсчетов, что необходимо учитывать при синтезе соответствующей контролирующей процедуры.

Список литературы

1. Никифоров И.В. Последовательное обнаружения изменения свойств временных рядов. М.: Наука, 1983. 200 с.

2. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамически систем: Пер. с англ./ Бассвиль М., Вилски А., Банвенист А. и др. М.: Мир, 1989. 278 с.

3. Roberts, S.W. (966) A Comparison of Some Control Chat Procedures. Technometrics. Vol 8, №3, p. 411 – 430.

4. Page E. S. (1954) Continuous Inspection Schemes. – Biometrika, 1954, 41(1), p.100-115.

5. Shafid Ahmad. Bibliometric Analysis of EWMA and CUSUM Control Chart Schemes. – ITEE Journal, Volume 7, Issue 2, April 2018, p. 1 – 11.

6. Филаретов Г.Ф., Ларин А.А., Локтюшов В.А. Параметрический МА-алгоритм обнаружения разладки гауссовского временного ряда по математическому ожиданию // Вестник МЭИ. 2022. №5. С. 112 – 120.

7. D. C. Montgomery and C. M. Mastrangelo. Some statistical process-control methods for autocorrelated data. – Journal of Quality Technology, vol. 23, July 1991, p. 179-193.

8. Воробейчиков С.Э., Кабанова Т.В. Обнаружение момента разладки процесса авторегрессии. // Вестник Томского государственного университета. 2003. № 280. С. 170-174.

9. Попов И.О., Филаретов Г.Ф. Обнаружение разладки в коррелированных временных рядах с использованием алгоритма кумулятивных сумм. // Материалы XXXX юбилейной международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT+SE'2012» (Приложение к журналу «Открытое образование»). 2012. С. 253 – 255.

10. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. Учебник для вузов. М.: Ю НИТИ, 1998. 1022 с.

Филаретов Геннадий Федорович, д-р техн. наук, профессор, gefefi@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Цинь Юйдэ, аспирант, qyd38160@163.com, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ALGORITHM FOR OPERATIVE DETECTION OF A TIME POINT CHANGES IN THE MATHEMATICAL EXPECTATION OF THE PROCESS AUTOREGRESSIONS OF THE 1-ST ORDER

G.F. Filaretov, Qin Yude

The work is devoted to the problem of constructing a controlling algorithm designed for operative detection of changes in the probabilistic properties (disorder) of the 1-st order autoregressive process, when the disorder is associated with an abrupt change in its mathematical expectation. To solve this problem, it is proposed to use the moving average algorithm or MA- algorithm. Using the simulation method, reference information was obtained that allows to synthesize a controlling MA-algorithm with specified properties and assess the degree of influence of the correlation of time series values on these properties.

Key words: detection of discord by mathematical expectation; moving average algorithm; 1-st order autoregressive process.

Filaretov Gennady Fedorovich, doctor of technical sciences, professor, gefefi@yandex.ru, Russia, Moscow, National Research University "MPEI",

Qin Yude, postgraduate, qyd38160@163.com, Russia, Moscow, National Research University "MPEI"

УДК 681.518.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-242-243

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ВЫХОДНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СТРУКТУРНО-СТОХАСТИЧЕСКОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ

А.Ю. Иваню

Рассматривается процесс контроля технического состояния бортовых систем космических средств с использованием структурно-стохастических вычислительных моделей. Сформулированы этапы вычисления достоверности контроля технического состояния космических средств. Предлагаемый алгоритм отличается от известных тем, что в результате его реализации вычисляется достоверность оценки выходного параметра структурно-стохастической вычислительной модели. Использование вычисленного показателя достоверности позволит упростить процесс контроля технического состояния, а также учесть возможные искажения телеметрической информации.

Ключевые слова: техническое состояние, достоверность, G-модель, телеметрическая информация, стохастические грамматики.

Структурно-стохастическая вычислительная модель контроля технического состояния космических средств. В современном состоянии развития космической техники, которая в настоящее время становится все более сложной и постоянно расширяющей сферу своего применения, особую актуальность имеют вопросы оперативного контроля и диагностирования технического состояния (ТС) космических средств (КСр), поскольку это влияет на качественное выполнение возложенных на КСр функциональных задач.

Отличительной особенностью КСр является необходимость осуществления автоматизированной системой управления целого комплекса управляющих воздействий, направленных на решение целевых задач. Поэтому управляющие воздействия в рассматриваемой предметной области можно назвать технологическим процессом, осуществляемым по управляющему алгоритму, а процесс контроля ТС можно соотнести с контролем за состоянием вычислительного процесса (при его автоматизированном оценивании) [1]. При наблюдении за состоянием КСр на самом деле производится наблюдение за нужными параметрами вычислительного процесса – входными и выходными операндами используемых вычислительных модулей – и проверяется соответствие их значений заранее заданным эталонным значениям. Таким образом, при оценивании ТС КСр на самом деле производится наблюдение за вычислительным процессом, поскольку посредником между объектом управления и органом, принимающим решение, является вычислительная система [2].

Для описания сложно формализуемых ВМ и процесса получения оценок ТС, возможно использовать так называемые G-модели, которые были разработаны в рамках концептуального моделирования и программирования в ограничениях [3].

Синтезируемые на основе G-модели программные комплексы позволяют оценивать состояния КСр с применением методов теории распознавания образов. В реальной ситуации состояние бортовой системы (БС) КСр характеризуется значениями её телеметрируемых параметров (ТМП). Таким образом, можно говорить о том, что оценивание состояния БС есть ни что иное, как автоматизированное распознавание состояния через текущие значения её ТМП. В таком случае, об оценивании состояния БС КСр можно говорить в терминах классической задачи теории распознавания образов, которая по своей содержательной сути сводится к отнесению распознаваемого объекта к одному из заданных классов состояний. В рамках традиционной прикладной интерпретации задачи оценивания ТС БС распознаваемый объект представляется в виде набора значений её ТМП, а ТС – это класс, к которому необходимо отнести распознаваемый объект [4].

Одним из методов распознавания, которые успешно применяются на практике, являются структурные методы. Однако, применительно к исследуемой предметной области, такие модели имеют и недостатки, основным из которых является отсутствие учета неопределённости исходной телеметрической информации (ТМИ), вызванной неоднородностью, неполнотой, избыточностью и разнообразием смыслового содержания.

Для устранения этого недостатка предлагается использовать комбинированные методы распознавания, а именно – объединить структурные и стохастические вычислительные модели. Комплексирование этих методов может обеспечить наибольший эффект от применения процедуры распознавания.

Суть предлагаемых структурно-стохастических ВМ, заключается в комбинировании в рамках одной модели всех возможностей структурных и стохастических (статистических) моделей. Они совмещают в себе достоинства структурных моделей по возможностям априорного описания предметной области для оценивания ТС БС КСр и их экономичности к ресурсам с достоинствами стохастических моделей, позволяющих наиболее полно учитывать неопределенность ТМИ и влияние возможных искажений.

В условиях наличия отмеченных выше неопределенностей структурным ВМ необходимо иметь стохастический характер. Для этого используется структурно-стохастическая ВМ в виде стохастической грамматики (СГ).

СГ G_S есть кортеж [3]

$$G_S = \langle S_S, N_S, T_S, R_S, \pi_s, \pi_R \rangle,$$

где $S_S = \left\{ A_i \mid i = \overline{1;n} \right\}$ – счетное (чаще – конечное) множество аксиом СГ; N_S – конечное множество нетерминальных (промежуточных) символов СГ, алфавит нетерминалов; T_S – конечное множество терминальных символов СГ, алфавит терминалов; $R_S = \left\{ r_i \mid i = \overline{1;n} \right\}$ – конечное множество правил вывода (подстановки); π_S – биективное отображение, сопоставляющее каждому элементу алфавита $A_i \in S_S$ его вероятностную меру $\pi_S : S_S \to E$; π_R – биективное отображение, сопоставляющее каждому правилу вывода $r_i \in R_S$ его вероятностную меру $\pi_R : R_S \to E$.

Подобно тому, как любая формальная грамматика (ФГ) порождает соответствующей ей формальный язык, так и СГ порождает стохастический язык (СЯ) $L(G_S) = L_S$ [5]. Отличительной чертой такого языка является тот факт, что каждое его слово $\alpha^S \in L^S$ имеет свою вероятностную меру, а сумма вероятностей всех слов языка равна единице:

$$\sum_{\alpha^S \in L^S} P(\alpha^S) = 1.$$

Таким образом, структурно-стохастической ВМ называется такая структурная ВМ, реализующая структурный оператор $f_j \in F_S$ G-сети S_G, что для каждого значения $\overline{x}^i \in D_{x^-}$ её выходного параметра имеется СЯ L_i^S в алфавите значений ее входных параметров $(D_{x_1^+} \times D_{x_2^+} \times \ldots \times D_{x_{k^+}^+})^*$.

Алгоритм оценивания достоверности выходных значений структурно-стохастической вычислительной модели. В структурно-стохастической ВМ каждому выходному значению $\overline{x}^i \in D_{x^-}$, а значит, и соответствующей ему аксиоме $A_i \in S_S$, сопоставлена стохастическая мера $P(\overline{x}^i) = P(A_i)$. Данная стохастическая мера и является показателем достоверности (правдоподобия) *k*-ого значения выходного параметра x_i, вычисляемого структурно-стохастической ВМ, и определяется как вероятность

$$P(x_j = \overline{x}_j^k \;/\; \alpha^S) = d_j^k.$$

Эта величина представляет собой условную вероятность принятия в качестве оценки вычисления выходного параметра x_i значения $\overline{x}_j^k \in D_{x_j}$ по структурно-стохастической ВМ при условии, что терминальной цепочкой, сформированной в алфавите значений входных параметров этой ВМ из СЯ $(D_{x_1^+} \times D_{x_2^+} \times \ldots \times D_{x_{k^+}^+})^*$ является α^S.

Следовательно, величина d_j^k соответствует параметру, определяющему достоверность (правдоподобность) результата реализации ВМ. В связи с этим, за оценку значения выходного параметра x_j структурно-стохастической ВМ наиболее предпочтительно принять величину $\overline{x}_j^k \in D_{x_j}$, которая соответствует максимальному значению показателя достоверности d_j^k [4].

В том случае, если некоторый оператор $f_j \in F_S$ G-сети S_G представлен своей структурно-стохастической ВМ, то при организации вычислений по этой G-сети должен использоваться специальный алгоритм оценивания достоверности выходных значений структурно-стохастической ВМ.

Такой алгоритм можно описать последовательностью шагов, которая будет включать:

Шаг 1. Определение исхода структурного анализа входного слова.

Реализация общего алгоритма вычисления достоверности структурно-стохастических ВМ зависит от исхода структурного анализа входного слова α^*: первый исход – слово α^* не принадлежит языку $L\left(G^k\right)$, порождаемому заданной ФГ. В этом случае вероятность $P(\overline{x}^k / \alpha^*)$ принимает нулевое значение; второй исход – слово α^* принадлежит языку $L\left(G^k\right)$, порождаемому заданной ФГ. В этом случае алгоритм анализа формирует еще и слово вывода

$$\alpha_V^* = r_1^* r_2^* ... r_v^*,$$

соответствующее полному (терминальному) выводу слова α^*, где $r_1^*, r_2^*, ..., r_v^*$ – индексы правил вывода R в анализируемой ФГ.

Шаг 2. Вычисление условных вероятностей выводимости цепочки.

При втором исходе вероятность $P(\overline{x}^k / \alpha^*)$ определяется с учетом слова вывода α^*. Вначале вычисляется условная вероятность выводимости цепочки α^* в каждой k -ой СГ из множества:

$$P\left(\alpha^* / \overline{x}^k\right) = P\left(\alpha_V^*\right) = P\left(r_1^* r_2^* ... r_{v^*}^*\right) = P\left(r_1^*\right) \cdot P\left(r_2^*\right) \cdot ... \cdot P\left(r_{v^*}^*\right) = \prod_{v=1}^{v^*} P\left(r_v^*\right).$$

Поскольку вероятности $P\left(r_v^*\right)$ есть не что иное, как восстановленные стохастические меры – вероятности $\tilde{\tilde{p}}_{i,j}^k$ применения правил вывода для СГ, тогда

$$P\left(\alpha^* / \overline{x}^k\right) = \prod_{\langle i,j \rangle \in I_{\alpha_V^*}} \tilde{\tilde{p}}_{i,j}^k,$$

где $I_{\alpha_V^*}$ – множество индексов правил вывода, которые используются в слове вывода.

Шаг 3. Вычисление апостериорных вероятностей для всех значений выходных параметров.

Если для вычисления вероятности $P(\overline{x}^k / \alpha^*)$ воспользоваться байесовским подходом, то верным будет выражение

$$P\left(\overline{x}^k / \alpha^*\right) = \frac{P\left(\alpha^* / \overline{x}^k\right) \cdot P\left(\overline{x}^k\right)}{\sum_{l=1}^{\left|D_{x^-}\right|} P\left(\alpha^* / \overline{x}^l\right) \cdot P\left(\overline{x}^l\right)}.$$

Поскольку при рекуррентной процедуре вычисления значений ВМ выражения для $P\left(\overline{x}^k\right)$ в правой части равенства представляют собой $P\left(\overline{x}^k / \alpha^*\right)$ с предыдущего шага, тогда рекуррентный алгоритм определения вероятности $P\left(x^- = \overline{x}^k\right) P\left(\overline{x}^k\right)$ на каждом m-ом шаге определится так:

$$P\left(\overline{x}^k\right)|_{m+1} = \frac{P\left(\alpha^* / \overline{x}^k\right) \cdot P\left(\overline{x}^k\right)|_m}{\sum_{l=1}^{\left|D_{x^-}\right|} P\left(\alpha^* / \overline{x}^l\right) \cdot P\left(\overline{x}^l\right)|_m}.$$

Шаг 4. Принятие решения о присвоении оценки выходного параметра.

Решающее правило выбора наиболее достоверного значения выходного параметра при реализации рекуррентных вычислений по соответствующей ВМ на m-ом шаге имеет вид:

$$\tilde{x}^-|_{m+1} = \arg\max_{\overline{x}^k \in \left|D_{x^-}\right|} \left\{ P\left(\overline{x}^k\right)|_{m+1} \right\},$$

для которого $P\left(\overline{x}^k\right)|_{m+1}$ определяются с использованием предыдущего выражения. После выбора наиболее достоверного значения параметра, принимается решение о присвоении оценки выходного значения структурно-стохастической ВМ.

Заключение. Сегодня не существует универсального подхода к моделированию процесса функционирования объекта анализа ТС, учитывающего все особенности предметной области испытаний и применения КСр. Однако, наиболее перспективными и удовлетворяющими большинству из показателей качества [6] способами моделирования являются комплексные модели вычислительных процессов.

Для учета неопределенности исходной ТМИ КА, вызванной неоднородностью, неполнотой, избыточностью и разнообразием смыслового содержания, предлагается воспользоваться многошаговой процедурой, при реализации которой попеременно используется эвристический и статистический подходы. Это позволит самым эффективным образом использовать не только всю имеющуюся априорную информацию, но и организовать рекуррентную процедуру дообучения модели – при обработке дополнительной обучающей информации, содержащей в себе и искаженные значения ТМП.

С учетом этого, применение представленного алгоритма оценивания достоверности выходных значений структурно-стохастической ВМ обеспечит вычисление для каждого возможного вида ТС БС его вероятности, что упростит процесс принятия окончательного решения о виде ТС, а также позволит учесть сопутствующую неполноту и искаженность ТМИ.

Список литературы

1. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Новые информационные технологии мониторинга и управления состояниями сложных технических объектов в реальном масштабе времени // Труды СПИИРАН. 2005. Т. 2. № 2. С. 249-265.

2. Копкин Е.В., Иваню А.Ю. Применение технологий искусственного интеллекта в процессах контроля и диагностирования бортовых систем космических средств // Авиакосмическое приборостроение. 2022. № 7. С. 42-49.

3. Охтилев М. Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализ: монография / М. Ю. Охтилев. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 1999. 162 с.

4. Иваню А. Ю., Копкин Е. В. Структурно-стохастическая вычислительная модель контроля технического состояния бортовых систем космических аппаратов // Известия Тульского государственного университета «Технические науки». 2022. № 10. С. 9-14.

5. Максимова Т. М. Теория автоматов и формальных языков: методические указания к выполнению лабораторных работ. СПб.: ГУАП, 2012. 26 с.

6. Шмелёв В. В., Охтилев М. Ю. Система показателей качества моделей технологических процессов функционирования ракетно-космической техники // Информационно-управляющие системы. 2016. №6 (85). С. 34-42.

Иваню Анна Юрьевна, адъюнкт, vka@mil.ru Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

ALGORITHM FOR ESTIMATING THE RELIABILITY OF THE OUTPUT VALUES OF A STRUCTURALLY STOCHASTIC COMPUTATIONAL MODEL

A.Y. Ivanyu

The process of monitoring the technical condition of onboard systems of space vehicles using structural-stochastic computational models is considered. The stages of calculating the reliability of monitoring the technical condition of space facilities are formulated. The proposed algorithm differs from the known ones in that as a result of its implementation, the reliability of the estimation of the output parameter of a structurally stochastic computational model is calculated. The use of the calculated reliability indicator will simplify the process of monitoring the technical condition, as well as take into account possible distortions of telemetry information.

Key words: technical condition, reliability, G-model, telemetry information, stochastic grammars.

Ivanyu Anna Yuryevna, adjunct, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky

УДК 629.78
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-245-246

КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСПУТНИКОВЫМИ СИСТЕМАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

А.Е.Привалов, А.В.Смирнов, М.С.Токарев

В статье предложена концепция управления многоспутниковыми системами (МС) с применением цифровых двойников, позволяющая реализовать групповое управление МС в условиях ограничений, специфических для объектов, функционирующих в космическом пространстве. Проведен анализ существующей системы управления (СУ) космическими аппаратами и выявлены основные проблемы ее реализации для управления МС. Сформулированы ключевые определения и обоснованы принципы управления. Разработана концептуальная модель СУ МС с применением цифрового двойника, реализующая предложенные принципы управления.

Ключевые слова: многоспутниковая система, система управления, цифровой двойник, принципы управления.

Современные условия применения орбитальных группировок (ОГ) характеризуются высокими требованиями к оперативности, глобальности и непрерывности предоставления услуг. Для удовлетворения этих требований приоритетным направлением развития ОГ является использование многоспутниковых группировок малых космических аппаратов (МКА).

Состав современных многоспутниковых ОГ может варьироваться от нескольких сотен до нескольких тысяч космических аппаратов (КА). Увеличение количества КА обуславливает изменение концепции с управления отдельными КА - к групповому управлению ОГ в целом, как целеустремленной технической системой.

Вместе с тем, управление многоспутниковыми ОГ осуществляется в условиях множества ограничений, специфических для условий функционирования ОГ в космическом пространстве. Наличие этих ограничений задерживает реализацию разработанных в настоящее время технологий управления многоспутниковыми ОГ, основанных на методах группового управления, искусственного интеллекта и многоагентных моделях [1-6].

В статье предложена новая концепция управления многоспутниковыми системами (МС), основанная на применении цифрового двойника, которая позволяет реализовать групповое управление МС в условиях ограничений, специфических для объектов, функционирующих в космическом пространстве.

Анализ существующих подходов к управлению орбитальными группировками. Существующая в настоящее концепция автоматизированного управления ОГ КА сложилась на этапе создания первых ОГ во второй половине XX века.

Она базируется на следующих основополагающих принципах:

– *принцип программного управления*, заключающийся в том, что программа управления формируется заранее, до начала процесса управления, а в процессе управления осуществляется только её отработка;

– *принцип дискретного управления*, заключающийся в том, что управляющие воздействия (а также сигналы обратной связи) передаются в некоторые заранее определенные интервалы времени (сеансы управления), обусловленные главным образом зонами радиовидимости с КА;

– *принцип оптимальности управляющего воздействия*, заключающийся в синтезе программ управления по критерию оптимальности эффективности применения ОГ.

Объектом управления выступает космическая система (КС), элементами которой являются командно-измерительные системы наземного комплекса управления (НКУ) КА, комплексы приема и обработки информации (КПОИ) и космические аппараты, входящие в ОГ (рис. 1).

Исходными данными для НКУ КА являются заявки потребителя услуг КС, представляющие собой формализованное выражение возникающей потребности в информации, которая может быть получена с применением КС.

Основными задачами НКУ КА являются [7]:

– сбор заявок от потребителей услуг КС;

– планирование применения КС, состоящее из комплексного планирования, (распределения ресурса КС), и текущего планирования (разработки рабочих программ (РП) КА, планов применения КИС, КПОИ и КА ретрансляции);

– проведение сеансов управления КА средствами КИС, которые включают в себя операции закладки на борт КА РП функционирования целевой аппаратуры и бортовых систем космической платформы, сверка и фазирование (коррекция) бортовой шкалы времени (БШВ), прием телеметрической информации (ТМИ) и информации о текущих навигационных параметрах (ИТНП);

– прием и обработка целевой информации (ЦИ) и предоставление ее потребителю;

– анализ качества полученной ЦИ и эффективности управления ОГ;

– анализ и прогнозирование технического состояния (ТС) КА по (ТМИ);

– анализ и прогнозирование параметров движения центра масс КА по (ИТНП);

– частотно-временное обеспечение КА.

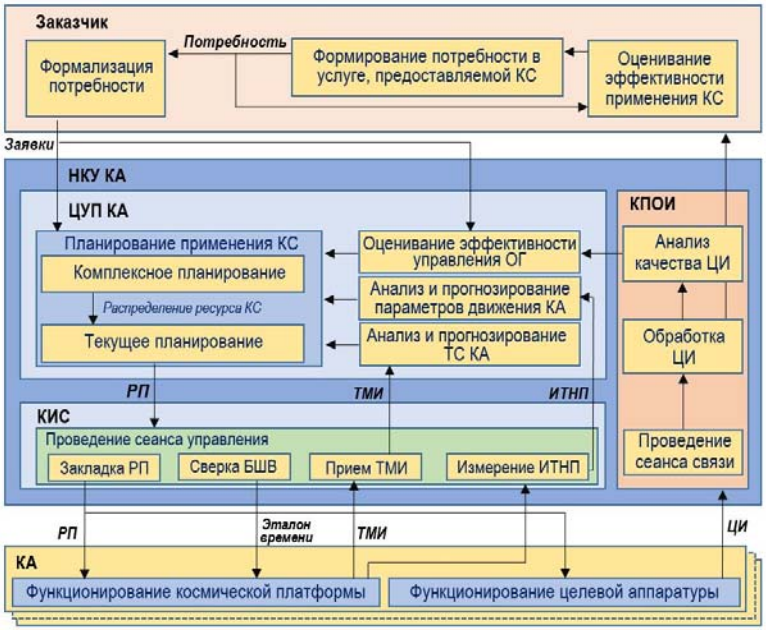


Рис. 1. Существующий цикл управления КА

Реализация концепции автоматизированного управления для многоспутниковых ОГ в современных условиях приводит к возникновению ряда проблем, основными из которых являются:

1. Многочисленность современных ОГ КА пропорционально увеличивает нагрузку на средства НКУ.

2. Дискретность сеансов управления приводит к существенным (по отношению к динамике изменения обстановки) задержкам при передаче управленческой информации, и не обеспечивает требуемое время реакции на изменение недетерминированной быстроменяющейся обстановки при управлении такими процессами, как мониторинг чрезвычайной ситуации или наблюдение за объектами в околоземном космическом пространстве.

3. Программное управление, основанное на принципе оптимальности вызывает необходимость пересчета программы управления при изменении хотя бы одного параметра.

Данные проблемы делают актуальной разработку новой концепции управления многоспутниковыми ОГ, в состав которой входят базовая терминология, принципы управления и концептуальная модель системы управления ОГ

Уточнение базовой терминологии. Базовая терминология концепции управления многоспутниковыми ОГ приведена в ГОСТ Р 53802-2010 «Системы и комплексы космические. Термины и определения» [8]. Однако, в связи с развитием многоспутниковых ОГ и появления у них новых качеств, требуется уточнение некоторых определений.

В соответствии с [8], под орбитальной группировкой КА понимается совокупность КА, расположенных на орбитах в соответствии с баллистической структурой и объединенных общностью решаемых задач в составе космической системы или комплекса. Исходя из данного определения, ОГ является элементом космической системы или комплекса.

Вместе с тем, переход к управлению ОГ в целом диктует необходимость рассмотрения ее как целеустремленной технической системы. В связи с этим, в рамках концепции полагается целесообразным введение термина *орбитальная система* (ОС), под которой понимается совокупность КА и линий межспутниковой связи, предназначенная для решения целевых задач в околоземном космическом пространстве.

Многоспутниковой системой (МС) называется ОС, обеспечивающая за счет большого количества КА статистическую устойчивость во времени показателей эффективности ее функционирования.

Система управления (СУ) МС представляет собой совокупность взаимосвязанных технических средств бортовых комплексов управления (БКУ) КА с программным обеспечением, предназначенных для управления МС.

Многоспутниковая система относится к классу многоагентных распределенных киберфизических систем [9], особенностью которой является среда функционирования – околоземное космическое пространство.

В связи с этим, управление МС должно базироваться на принципах управления целеустремленными системами в стохастических средах.

Принципы управления многоспутниковыми орбитальными системами. *Принцип непрерывности управления* заключается в немедленной реакции системы управления на изменения в объекте управления или внешней среде. Принцип требует от СУ МС получения информации об изменениях в режиме реального времени, а также немедленного начала цикла управления (в который входят выработка управляющего воздействия, его реализация и контроль) реакцией на изменение.

Принцип инкрементного планирования заключается в немедленной реакции системы управления на поступление заявки на выполнение целевой задачи. Принцип требует от СУ МС начала цикла управления процессом отработки заявки сразу после ее получения.

Принцип оперативности управления заключается в осуществлении управления в режиме реального времени, что требует от СУ МС обеспечения длительности цикла управления, не превышающем время изменения состояния объекта управления, внешней среды, а также требований потребителя услуг МС.

Определение МС как ЦУТС открывает возможность использования в составе основополагающих *принципа автономности управления*, который заключается в выработке управляющих воздействий средствами СУ МС.

Так как в состав СУ МС входят только технические системы бортовых комплексов управления КА, управление МС является автоматическим.

МС является распределенной системой, следовательно, для реализации автономного управления необходимым условием является *принцип интероперабельности системы управления*, заключающийся в способности двух и более БКУ КА, входящих в МС, к обмену управленческой информацией и использованию ее для выработки управляющих воздействий.

Принципы инкрементности и непрерывности управления требуют немедленной реакции на изменение ситуации. В случае реализации оптимального управления, реакция заключается в определении оптимального решения при каждом изменении ситуации, что допустимо в случае прогнозируемых изменений ситуации и наличии времени на определение оптимального решения.

При функционировании МС в условиях динамической недетерминированной среды, выдвигаются очень жесткие требования к оперативности управления. Принцип ситуационного управления позволяет повысить оперативность управления, однако требует формализации множества ситуаций, возникающих при управлении МС.

В данных условиях наиболее адекватным является *принцип гарантированного управления* [10], который основан на критерии максимума минимальной эффективности решения отдельных задач управления и допускает введение новых задач без пересчета всей программы управления.

В настоящее время проведены исследования в области автономного управления ОГ в целом [1-6], использующие методы искусственного интеллекта, агентного моделирования и децентрализованного управления.

Реализация данных методов сопряжена со следующими особенностями, которые на текущем уровне развития технологий выступают ограничивающими факторами:

1. Недостатки, присущие самоорганизующимся системам, главный из которых состоит в непредсказуемости и, в большинстве случаев, неоптимальности решения, что является недопустимым при управлении такими критически важными объектами, как МС. В связи с этим, возникает необходимость тщательной наземной отработки алгоритмов управления.

2. Необходимость в глобальной телекоммуникационной системе (ТКС), осуществляющей передачу управленческой и целевой информации с НКУ на МС, а также между КА.

3. Высокие требования к вычислительным и энергетическим ресурсам КА, необходимым для выработки управленческих решений и реализации межспутникового взаимодействия.

С другой стороны, следует отметить и ряд перспективных направление совершенствования НКУ КА: создание унифицированных наземных станций; автоматизация управления и использование цифровой математической модели ОГ [11]. Все эти факторы должны быть учтены при разработке концептуальной модели системы управления МС.

Концептуальная модель системы управления многоспутниковыми системами с применением цифрового двойника. Современным подходом к управлению сложными системами, который применяется в условиях ресурсных ограничений и сложности алгоритмов автономного управления, является применение цифрового двойника.

Цифровым двойником (ЦД) МС называется система, состоящая из цифровой модели МС и двусторонних информационных связей с МС [12].

Целью создания цифрового двойника является перенос процесса функционирования МС в виртуальное пространство, позволяющее решать следующие задачи:

– моделирование и прогнозирование динамики развития ситуаций;

– выработка и оценивание эффективности управляющих воздействий;

– формирование ситуационной осведомленности эксплуатирующего персонала.

Применение ЦД позволяет применять возможности высокопроизводительных вычислительных комплексов и суперкомпьютерных технологий, необходимых для реализации методов и алгоритмов автономного управления МС.

Необходимым условием функционирования ЦД является наличие непрерывной двухсторонней связи с МС.

В связи с этим, следует отметить следующие характерные черты развития космической техники:

– функционирование КС связи на всех высотах (Inmarsat, Iridium, O3b и др.) [13], а также мегагруппировок Starlink, OneWeb, Kepler [14].

– разработка в рамках отечественной программы «Сфера» ОГ связи на высокоэллиптической («Экспресс-РВ»), средней («Скиф») и низкой («Гонец», «Марафон») орбитах [15].

– разработки в области управления ОГ с применением КА ретрансляции на низких и высоких орбитах [16,17].

Таким образом, объекты, функционирующие в околоземном космическом пространстве, могут быть включены в глобальную ТКС, формируемую наземными и орбитальными средствами. Наличие глобальной ТКС обеспечивает двухсторонний обмен между цифровой моделью и объектом управления и создает необходимые условия для реализации ЦД.

Концептуальная функциональная модель ЦД в составе процесса управления МС с применением ЦД представлена на рис. 2.

Основными ее элементами являются планирование применения МС, моделирование функционирования МС в реальном масштабе времени с применением МС, оценивание эффективности управления МС, двухсторонний обмен ЦД с МС с применением ТКС.

Цифровой моделью (ЦМ) МС называется система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов, описывающая структуру, функциональность и поведение МС на различных стадиях жизненного цикла. Ввиду того, что МС как объект управления представляет собой многоагентную распределенную киберфизическую систему, в качестве ЦМ используется многоагентная модель, основными элементами которой являются:

– ЦМ агентов – КА, входящих в МС;

– ЦМ среды функционирования агентов, основными элементами которой являются модели Земли, Солнца, других небесных тел и космических объектов;

– модель взаимодействия агентов – совокупность моделей линий межспутниковой связи;

– модель взаимодействия агентов со средой – совокупность моделей линий связи с наземными объектами, моделей взаимного движения агентов и среды и т.д.

Технология планирования применения МС – совокупность интегрированных в ЦМ МС методов и алгоритмов планирования применения МС. Технология планирования должна основываться на методах децентрализованного управления, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с централизованными методами:

– позволяют быстро (в режиме синхронного функционирования с МС) сформировать реакцию на изменение ситуации;

– учитывают индивидуальные особенности каждого агента;

– позволяют дополнить план при поступлении новой задачи (а не пересчитывать его полностью).

Технология оценивания эффективности управления МС – совокупность моделей, методов и алгоритмов принятия решения о соответствию программы управления предъявляемым к ней требованиям.

База знаний ЦД включает в себя базу моделей операций, базу моделей оценивания эффективности операций, а также онтологию предметной области и совокупность правил, определяющая поведение агентов.

Применение концепции управления МС с применением ЦД обеспечит удовлетворение требований к СУ за счет:

– оперативности реакции на изменение обстановки децентрализованным алгоритмом управления;

– наличия ТКС, которая обеспечивает двухстороннюю передачу управленческой информации в режиме реального времени;

– достаточных вычислительных и энергетических ресурсов на НКУ;

– программной реализации информационного обмена между КА;

– возможности запуска нескольких копий ЦД с целью отработки и статистического анализа алгоритмов управления.

Недостатком предлагаемой концепции является несоблюдение принципа автономности управления. Вместе с тем, ЦД МС может использоваться в качестве испытательного стенда для наземной отработки алгоритмов управления, которые по мере совершенствования этих алгоритмов, повышения энергетических и вычислительных

возможностей КА, а также совершенствования линий межспутниковой связи, могут быть реализованы на борту КА. Благодаря расположению на НКУ, ЦД может функционировать как в автоматическом, так и в автоматизированном режиме.

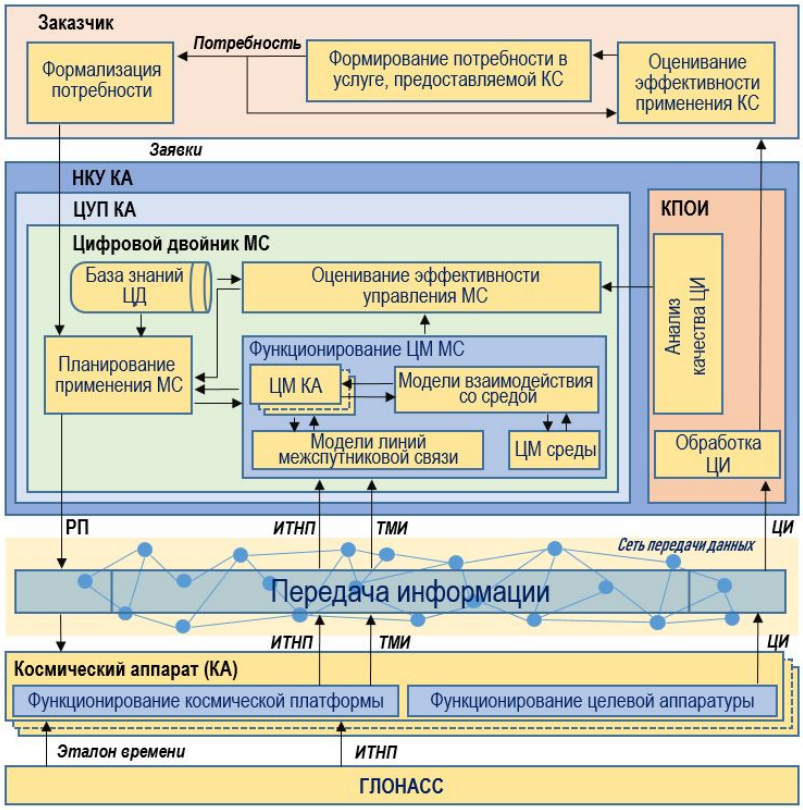


Рис. 2. Структура процесса управления ОГ с применением ЦД

Заключение. Стремительное развитие технологий создания малых КА привело к возможности создания МС, что, в свою очередь, стало причиной возникновения противоречия между требованиями к СУ МС и невозможностью их реализации с применением имеющихся на борту ресурсов.

Применение цифровых двойников МС, как современной технологии управления сложными объектами, может стать альтернативой проведению дорогостоящих исследований по совершенствованию бортовых систем КА, а также платформой для отработки и совершенствования программно-алгоритмического обеспечения СУ МС.

Применение ЦД МС открывает возможность использования более ресурсоемких алгоритмов управления, основанных на современных технологиях искусственного интеллекта и нейросетевых технологиях, а также позволяет использовать весь накопленный в процессе жизненного цикла объем данных о МС.

Список литературы

1. Групповое управление многоспутниковой орбитальной группировкой на основе концепции режимов совместного функционирования А. Ю. Потюпкин, Ю. А. Тимофеев, С. А. Волков // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Том 8, вып 3. С. 11–19.

2. Каляев И.А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 280 с.

3. Карсаев О.В. Автономное планирование задач наблюдения в группировках спутников // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 1 (203). С. 129-143.

4. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли / А.В. Соллогуб, П.О. Скобелев, Е.В. Симонова, А.В. Царев, М.Е. Степанов, А.А. Жиляев / Информационно-управляющие системы. 2013. № 1 (62). С. 16-26.

5. Городецкий В.И., Карсаев О.В. Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 2 (187). С. 234-247.

6. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Д.А. Белоглазов, А.Р. Гайдук, Е.Ю. Косенко [и др.]; под ред. В.Х. Пшихопова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 305 с.

7. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления: учебник / Ю.С. Мануйлов, В.Н. Калинин, В.С. Гончаревский, И.И. Делий, Е.А. Новиков; под общ. ред. Ю.С. Мануйлова. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2010. – 609 с.

8. ГОСТ Р 53802–2010. «Системы и комплексы космические. Термины и определения» утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 июля 2010 г. № 127-ст / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш) М.:Стандартинформ, 2019. 34 с.

9. ПНСТ 417-2020 «Система киберфизическая. Термины и определения». М.:Стандартинформ, 2020. 8 с.

10. Основы теории систем и управления: учебник / В.Н. Калинин, К.Г. Колесников, Б.В. Москвин, А.Н. Павлов; под общей редакцией К.Г. Колесникова. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – 495 с.

11. Построение единого наземного комплекса управления многоспутниковой группировки КА ДЗЗ /А. И. Жодзишский, С. К. Жидкова, Д. Н. Нагорных // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020, том 7, выпуск 4. С. 14–21.

12. ГОСТ Р 57700.37 – 2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения / Разработан ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» совместно с СПб ПУ Петра Великого; утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 сентября 2021 г. № 979-ст; введен впервые. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 16 с.

13. Михайлов Р.Л. Описательные модели систем спутниковой связи как космического эшелона телекоммуникационных систем специального назначения. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2019. – 150 с.

14. Erik Kulu. Satellite Constellations - 2021 Industry Survey and Trends // 35th Annual Small Satellite Conference 20 p.

15. Гриценко Андрей. Инновационные спутниковые сервисы на низких орбитах // CONNECT. № 11–12. 2019. С. 44-46.

16. Пат. 2713293. Российская Федерация, МПК B64G 3/00, H04B 7/00. Система управления полетом космического аппарата с применением в качестве ретрансляторов низкоорбитальных спутников, связанных между собой межспутниковыми линиями связи / А.Ю. Потюпкин, И.Н. Пантелеймонов, А.М. Саушкин [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Российские космические системы». № 2019114885; заявл. 16.05.2019; опубл. 05.02.2020, Бюл. N 4. 10 с.

17. Пантелеймонов И.Н. Перспективная методика управления полетом космических аппаратов одной орбитальной группировки с применением межспутниковых радиолиний // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018, том 5, выпуск 2. С. 73–83.

Привалов Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, докторант, 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,

Токарев Максим Сергеевич, канд. воен. наук, старший преподаватель, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им.А.Ф.Можайского

MULTI-SATELLITE SYSTEM MANAGEMENT CONCEPT USING DIGITAL TWINS

A.E. Privalov, A.V. Smirnov, M.S. Tokarev

The article proposes the concept of controlling multi-satellite systems (SS) using digital twins, which allows the implementation of group control of SS in conditions of restrictions specific to objects operating in outer space. An analysis of the existing spacecraft control system (CS) was carried out and the main problems of its implementation for SS control were identified. Key definitions are formulated and management principles are justified. A conceptual model of SS CS using a digital twin has been developed, implementing the proposed control principles.

Key words: multi-satellite system, control system, digital twin, control principles.

Privalov Aleksandr Evgenevich, candidate of technical sciences, doctoral, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Smirnov Alexey Vadimovich, candidate of militaring sciences, lecturer, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Tokarev Maxim Sergeevich, candidate of military sciences, senior lecturer, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 004.942
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-251-252

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЕРИФИКАЦИИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПЕТРИ

А.М. Попов

Рассматривается задача обоснования подхода к автоматизированной верификации алгоритмов обработки телеметрической информации. В основе подхода лежит структурно-функциональное представление процесса обработки телеметрической информации, построенное с помощью вычислительных сетей Петри. Целью такого представления является использование формальных правил анализа свойств сетей Петри и транспонирование результатов полученного анализа на реальный алгоритм обработки телеметрической информации. Предлагается достичь автоматизации процедуры поиска и коррекции ошибок для решения задачи достижимости за счет сведения уравнения достижимости к решению задачи линейного целочисленного программирования и анализу матриц входных и выходных инциденций на «нулевые» вхождения. Для свойства устойчивости предлагается анализировать матрицу выходных инциденций на наличие неединичных отношений и их последовательное зануление до решения уравнения достижимости. Новизна предлагаемого подхода заключается в возможности автоматизированного поиска и коррекции различного рода ошибок в алгоритмах обработки информации.

Ключевые слова: структурно-функциональная модель, двудольный граф, сеть Петри, автоматизированная обработка информации, телеметрическая информация, ошибки обработки, верификация.

Представление процесса обработки телеметрической информации с помощью вычислительной сети Петри. Структурно-функциональная модель представляет собой композицию функциональной модели, связи между которой описываются структурной моделью. На связях структурной модели формируются функции *соотнесения* и *измерения.* Функции соотнесения представляются помеченным, а функции измерения - взвешенным графом. Метка связи двух вершин графа представляет собой имя отношения, в котором находятся эти вершины. По степени отвлеченности от предмета рассмотрения отношения делятся на *предметные* и *отвлеченные* (абстрактные). Модели с предметными отношениями называют семантическими сетями. По существу, семантическая сеть является разновидностью онтологической модели.

Функции измерения представляются *взвешенным* графом. Вес связи количественно характеризует либо расстояния между вершинами графа, либо *пропускную способность* его ребер. Модели с весами ребер в роли пропускной способности относятся к потоковым моделям. Первичной характеристикой потока через дугу графа является величина непрерывного потока либо интенсивность дискретного потока, например, потока заявок. Вторичными характеристиками потока являются, например, время достижения им смежной вершины или стоимость транспортировки [1].

Сформированная модель сбора и обработки ТМИ представлена упорядоченным набором последовательностей проводимых операций и условий, необходимых для их выполнения, что в сути своей отражает алгоритм обработки ТМИ. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ, реализованная вычислительной сетью Петри, представлена на рисунке 1.

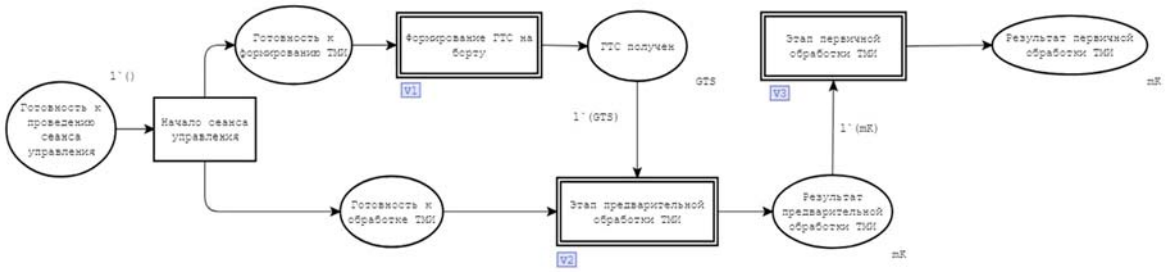


Рис. 1. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ

Данная модель реализована в среде CPN IDE [3] и отражает выполнение основных процедур сбора и обработки ТМИ, свойственных всем изделиям РКТ.

Модель является сложной иерархической вычислительной сетью Петри, поскольку маркерами данной сети являются переменные различного типа, переходы включают в себя [4,5] различные функции (математические, логические и т.п.), а также состоят из *вложенных* переходов, т.е. переходов, которые внутри сами являются сетью (V_1, V_2, V_3). Как реализованы вложенные процессы в данной модели представлено на рисунках 2-5.

Поскольку сформированная модель достаточно громоздкая для визуального представления всех ее элементов, (на рисунках 2-5 представлена некоторая часть модели рисунка 1) целесообразно представить ее в виде матрицы инцидентности, которая отражает взаимосвязи между элементами сети.

Матрица инцидентности сформированной структурно-функциональной модели представлена на рис. 6.

Матричное представление сформированной структурно-функциональной модели обработки ТМИ позволит проводить ее формальную верификацию с помощью анализа свойств сетей Петри [6], благодаря чему появится возможность не только проверять модель на наличие требуемых или нежелательных свойств, но и производить ее исправление, находить конкретное место возникновения ошибки в модели обработки ТМИ и прилагать меры по их компенсации.

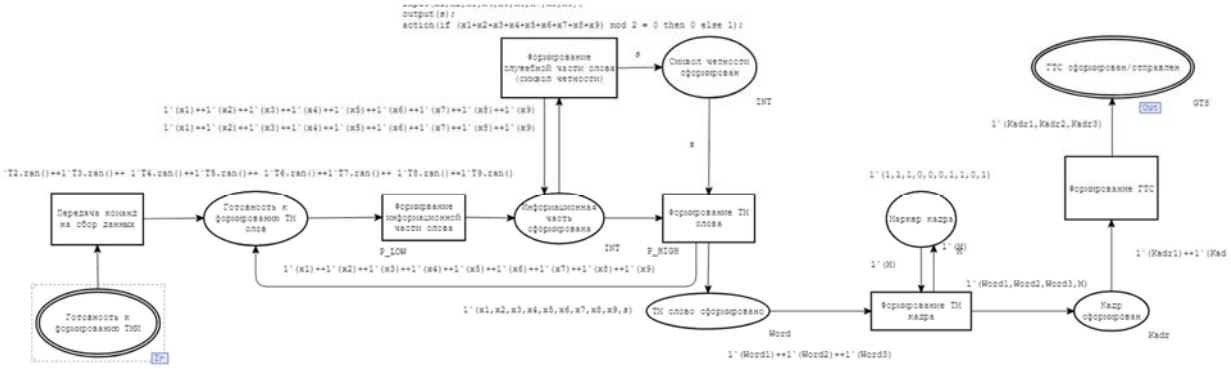


Рис. 2. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ (V_1)

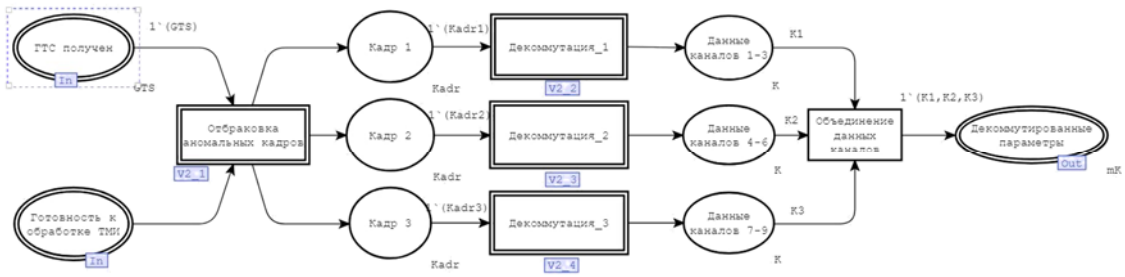


Рис. 3. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ (V_2)

Рис. 4. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ (V_{2_1})

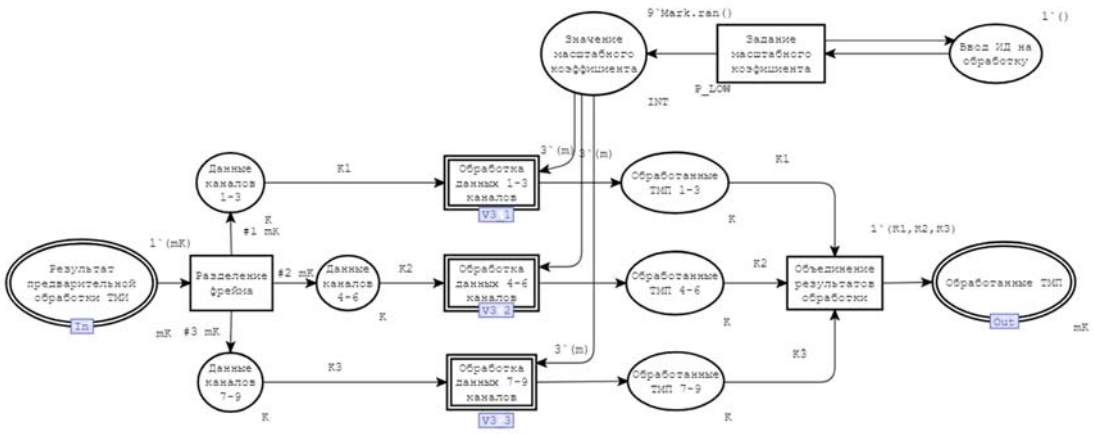


Рис. 5. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ (V_3)

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24	t25	t26	t27	t28	t29	t30	t31	t32	t33	t34	t35	t36	t37	t38	t39	t40
p1	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3	-4	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p4	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p6	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p7	0	0	0	-3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p8	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p10	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p12	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p15	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p17	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p22	0	0	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p23	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p29	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p55	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
p61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0
p62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
p63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0
p65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
p67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
p68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
p69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
p70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
p72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
p74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
p75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0
p76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
p77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1
p79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Рис. 6. Матрица инцидентности модели обработки ТМИ

Алгоритм автоматизированной верификации процесса обработки телеметрической информации. *Принцип работы алгоритма автоматизированной верификации процесса обработки ТМИ основан на анализе свойств сетей Петри и состоит из следующей последовательности шагов:*

1) Имеется алгоритм обработки ТМИ, необходимо сформировать его модель в вычислительной сети Петри (ВСП).

2) Модель алгоритма обработки ТМИ в ВСП сформирована.

3) На основании данной модели сформирована эквивалентная сеть Петри для проведения формального анализа ее свойств.

4) Построена матрица инцидентности сети Петри.

5) На этом шаге решается уравнение свойства достижимости [6]

$$\mu'^{T} = \mu^{T} + e^{T}[i] \cdot D \tag{1}$$

где μ'^{T} – вектор-строка, характеризующая требуемую (конечную) маркировку сети (будем считать ее известной априорно, т.к. она характеризует успешное окончание процедуры обработки ТМИ); μ^{T} – вектор-строка, характеризующая начальную маркировку сети (будем понимать набор условий, исходных данных и т.п., необходимых для успешного сбора и обработки ТМИ); $e^{T}[i]$ — вектор-строка, значения которой определяют номера и количество срабатываний переходов, переводящих сеть из μ^{T} в μ'^{T} (будем понимать операции проводимые с ТМИ при обработке и их последовательность) [6,7]; D — матрица инцидентности (отношения между элементами процесса).

6) При решении возможно 2 исхода:

а) уравнение достижимости решается корректно, т.е. система линейных уравнений имеет целые неотрицательные решения;

б) система не имеет решений. Если система корректна, переходим к шагу 21, если нет, к шагу 7.

7) Сводим полученную систему уравнений к задаче линейного программирования, для проверки правильности исходного состояния сети (начальной маркировке сети) и ее коррекции [8,9].

8) Задаем ограничения на целочисленность «корректировок» или «добавок»

$$d_j^{+}, d_j^{-} \in \mathrm{Z}, \forall j \in [1, k] \tag{2}$$

d_j^{+} – «положительная» поправка для i-го уравнения; d_j^{-} – «отрицательная» поправка для i-го уравнения.

9) Вводим целевую функцию, которая будет минимизировать количественное значение «корректировки» или «добавки» [9]. Это необходимо для того, чтобы алгоритм смог выявить минимальную меру коррекции для достижения требуемого состояния процесса, что позволит определить место коррекции

$$J = \sum_{j=1}^{k} (d_j^{+} + d_j^{-}) \to \min \tag{3}$$

где J – поправка, необходимая для решения системы уравнений с учетом ограничений на целочисленность $X \in \mathrm{Z}^{n}$, $X = \left\| x_i : i \in \overline{1,n} \right\|, \left\| \left(d_j^{+}, d_j^{-} \right) : j \in \overline{1,k} \right\|$;

10) Производим необходимые вычисления в соответствии со следующей моделью:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i1} x_i + d_1^{+} - d_1^{-} = -b_1 \\ \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i2} x_i + d_2^{+} - d_2^{-} = -b_2 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{n} \alpha_{ik} x_i + d_k^{+} - d_k^{-} = -b_k \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{n} \alpha_{in} x_i = -b_n \end{cases} \tag{4}$$

где k — количество входных уравнений в системе (т.е. k уравнений соответствует количеству входных позиций сети) [10-12]; α_{in} – коэффициент перед x в системе уравнений; b – свободный коэффициент в системе уравнений; n — количество уравнений в системе.

Другими словами, решается система целиком, но «корректировка» производится только для первых j-входных уравнений [13].

11) После выполнения процедуры коррекции начальной маркировки возможны 2 исхода:

а) коррекция дала решение, т.е. показала, где и на сколько необходимо исправить начальную маркировку для корректного решения уравнения достижимости. В этом случае корректируется маркировка следующим образом (шаг 20): $\Delta\mu = e^{T}[i] \cdot D$, $\Delta\mu = \mu'^{T} - \mu^{T}$, $\mu^{T} = \mu'^{T} - \Delta\mu$. (необходимо из конечной маркировки (принятой известной априорно) вычесть разность маркировок, полученную в результате коррекции) и перейти в шагу 21.

б) коррекция маркировки не дала решения. В этом случае делается вывод об ошибке в матрице инцидентности (ошибка в графе сети Петри соответственно).

12) Переходим к поиску ошибок в инциденциях матрицы.

13) Матрицу D^{-} необходимо проверить на наличие в ней «нулевых» строк переходов.

14) Матрицу D^{+} необходимо проверить на наличие в ней «нулевых» столбцов позиций.

15) Если такие строки существуют, необходимо на графе проверить и исправить дуги таким образом, чтобы из каждого промежуточного элемента множеств позиций и переходов выходили дуги [14], в соответствии с требованиями к последовательности операции и состояний. (делается оператором, алгоритм только показывает проблемные или «пустые» позиции и переходы)

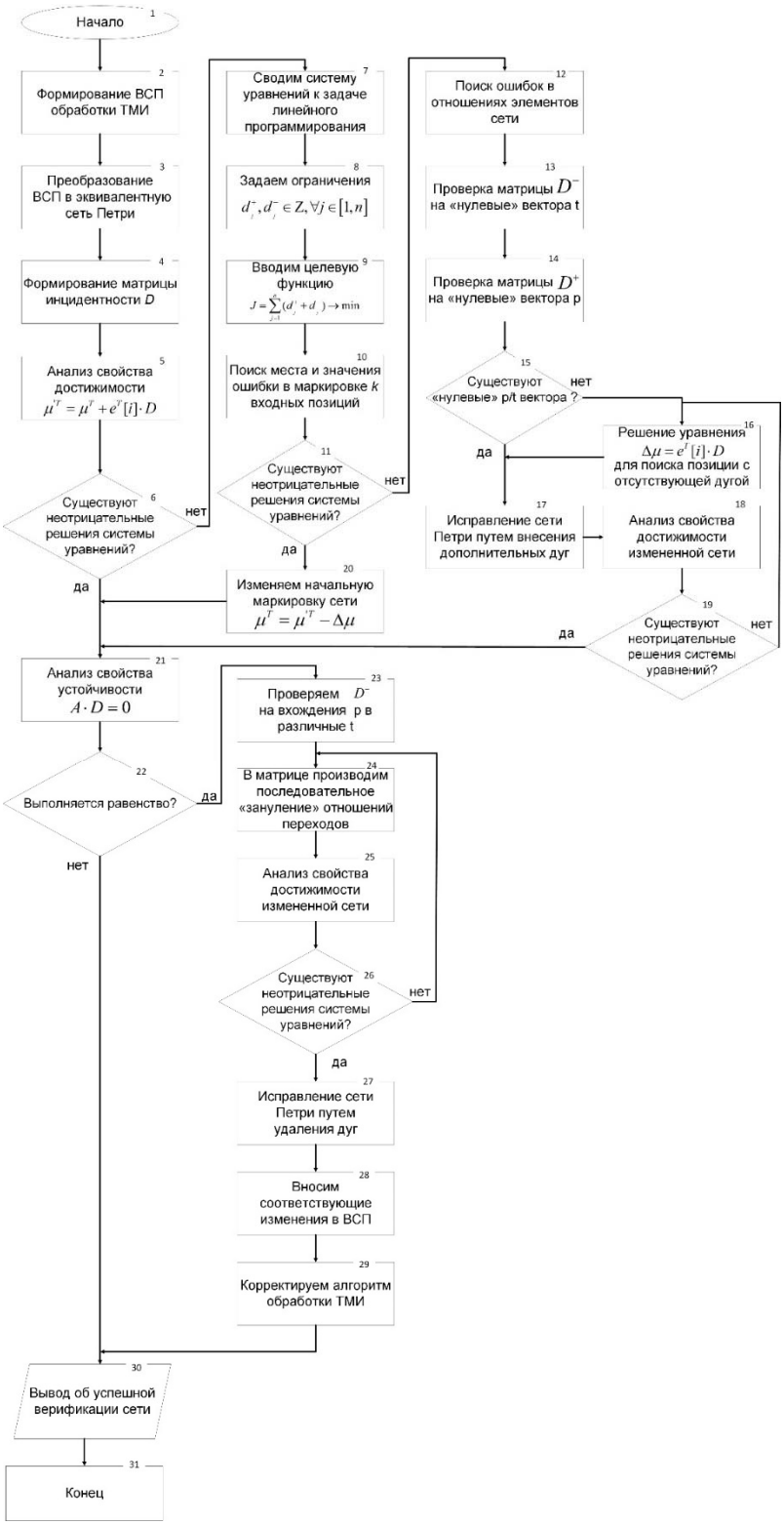


Рис. 7. Алгоритм верификации модели обработки ТМИ

16) Если таких строк и столбцов нет, тогда решаем уравнение достижимости $\mu'^T = \mu^T + e^T[i] \cdot D$ с учетом того, что μ'^T и μ^T принимаем за «истину» (можно считать что начальная маркировка соответствует определенному тестовому набору условий и ИД, при котором однозначно определяется конечная маркировка), при этом известно что каждый переход (операция обработки ТМИ) должен выполнится хотя бы один раз, чтобы достичь требуемого

состояния ($e^T[i]$ — единичный вектор). Тогда, в результате вычислений, получим 2 вектора $\Delta\mu = \Delta\mu'$ $(\Delta\mu' = e^T[i] \cdot D)$, значения которых сравниваются поэлементно, и отличия значений в элементах вектора $\Delta\mu'$ от $\Delta\mu$ будет свидетельствовать об ошибке в инциденциях в определенной позиции.

17) Оператору предлагается исправить дуги в графе сети Петри в позиции несоответствия (т.е. когда из определенного перехода пропущена дуга к нужной позиции (которая выявлена на шаге 16).

18) С учетом произведенных изменений в графе и в матрице инцидентности D решить уравнение достижимости для проверки изменений.

19) При отсутствии решения вернуться к шагу 16.

20) см. шаг 11.

21) Далее необходимо проверить сеть Петри на устойчивость, т.е. на наличие «вредных» зацикливаний. Для этого необходимо выполнение выражения

$$A \cdot D = 0 \tag{5}$$

где A – ненулевой вектор срабатываний переходов (в смоделированном алгоритме обработки ТМИ конечное состояние процесса достигается при срабатывании каждого перехода хотя бы один раз, поэтому вектор «единичный»), D – матрица инцидентности сети Петри алгоритма обработки ТМИ.

22) При анализе свойства устойчивости возможно 2 исхода:

а) если выражение не выполняется, тогда делается вывод о неустойчивости сети, следовательно отсутствии зацикливаний [14-15] и осуществляется переход к шагу 30.

б) если выражение выполняется, значит в алгоритме допущены зацикливания, влияющие на достижение требуемого состояния, необходимо выявить место зацикливания.

23) Проверяем матрицу D^- на возбуждения нескольких переходов одним состоянием системы (вхождением одним p в несколько t).

24) Производим последовательное «зануление» отношений переходов из одной позиции (т.е. последовательно «зануляем» t в столбце (строке) p).

После «зануления» решаем уравнение достижимости.

25)

26) При наличии некорректного решения уравнения достижимости возвращаемся к шагу 24.

27) При корректном решении уравнения достижимости исправляем граф сети Петри (предлагается оператору удалить одну из друг для выхода из возможного зацикливания).

28) На основании изменений, внесенных в сеть Петри исправляем модель в ВСП.

29) Производим интерпретацию изменения в ВСП на алгоритм обработки ТМИ и вносим соответствующие изменения.

30) Вывод об успешной верификации алгоритма обработки ТМИ.

31) Конец.

Заключение. Таким образом, предложен подход к автоматизированной верификации алгоритмов обработки телеметрической информации, основанный на структурно-функциональном представлении процесса обработки вычислительной сетью Петри. Суть подхода заключается в формальном анализе уравнений достижимости и устойчивости сети Петри на желательные и нежелательные свойства. Подход также позволяет проводить автоматизированную коррекцию ошибок, за счет использования в сети инструментов линейного целочисленного программирования.

Данный алгоритм может использован для поиска синтаксических и семантических ошибок в алгоритмах обработки телеметрической информации, а также для поиска и коррекции исходных данных на обработку, проверке логики работы алгоритмов.

Список литературы

1. Микони С. В., Соколов Б. В. Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов : монография С. В. Микони, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. М. : РАН, 2018. – 314 с.

2. Поиск путей решения задачи моделирования алгоритмов обработки телеметрической информации для их дальнейшей верификации / В.В. Шмелев, А.Ю. Николаев, А.М. Попов // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления»,2023. Вып. 2. С. 12-20.

3. Анализ задачи верификации алгоритмов обработки телеметрической информации / А.М. Попов, В.В. Шмелев, В.В. Ткаченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2023. Вып. 1. С. 3-8.

4. Зайцев Т.Р. Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools / Т.Р. Зайцев, Д.А. Шмелева // Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова. 2006. 68 с.

5. Систематизация требований к разработке перспективных аппаратно-программных комплексов обработки телеметрической информации ракетно-космической техники / В.В. Шмелев, В.В. Ткаченко // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Выпуск 646. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2015. С. 38-46.

6. Котов, В.Е. Сети Петри. М: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1984. 160 с.

7. Веретельникова Е.Л. Теоретическая информатика. Теория сетей Петри и моделирование систем / Е.Л. Веретельникова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. 82 с.

8. Модель верификации исходных данных в процессе обработки телеметрической информации на основе решения задачи линейного целочисленного программирования / Д.А. Павлов, А.М. Попов, В.В. Шмелев // Авиакосмическое приборостроение, 2023. № 7. С. 3-10.

9. Модель коррекции начальной маркировки классической сети Петри на основе решения задачи дискретного программирования / Д.А. Павлов, А.М. Попов, В.В. Ткаченко // Труды МАИ ,2023. № 131.

10. Рудаков, И.В. Алгоритм верификации программного обеспечения с помощью иерархических сетей Петри / И.В. Рудаков, В.О. Медведев // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 1 (91). С. 74-77.

11. Медведев В.О. Верификация программного обеспечения формализованного сетью Петри / В.О. Медведев, И.В. Рудаков // Современные научные исследования и разработки. 2017. № 7 (15). С. 230-233.

12. Применение метода ветвей и границ для решения задачи целочисленного линейного программирования / Е.А. Шиндина, Т.А Уразаева // Научному прогрессу – творчество молодых. – 2016. – № 3. – С. 319-321.

13. Смагин Б.И. Критический анализ решения задачи целочисленного линейного программирования методом Гомори / Б.И. Смагин, В.В. Машин // Наука и Образование. 2022. Т. 5. № 1.

14. Порядок формирования требований к качеству обработки измерительной информации ракетно-космической техники / В.В. Шмелев, Е.В. Копкин, Е.Б. Самойлов // Вооружение и экономика. 2018. №2. С. 23-28.

15. Шмелёв В.В. Обоснование методики мониторинга технического состояния ракет-носителей с компенсацией искажений процесса телеизмерений / В.В. Шмелёв, В.Г. Зиновьев, Д.О. Зайцев // Информация и Космос. 2019. № 4. С. 145-151.

Попов Антон Михайлович, адъюнкт, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

AN ALGORITHM FOR AUTOMATED VERIFICATION OF A STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL OF THE TELEMETRY INFORMATION BASED ON A PETRI NET.

A.M. Popov

The problem of substantiating an approach to automated verification of algorithms for processing telemetric information is considered. The approach is based on a structural and functional representation of the process of processing telemetric information, built using Petri nets. The purpose of this presentation is to use formal rules for analyzing the properties of Petri nets and transpose the results of the obtained analysis to a real algorithm for processing telemetry information. It is proposed to achieve automation of the error search and correction procedure for solving the reachability problem by reducing the reachability equation to solving the linear integer programming problem and analyzing the matrices of input and output incidents for "zero" occurrences. For the stability property, it is proposed to analyze the matrix of output incidents for the presence of nonunit relations and their sequential zeroing until the solution of the reachability equation. The novelty of the proposed approach lies in the possibility of automated search and correction of various kinds of errors in information processing algorithms.

Key words: structural and functional model, bipartite graph, Petri net, automated information processing, telemetry information, processing errors, verification.

Anton Mikhailovich Popov, adjunct, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky

УДК 004.72
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-257-258

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ ВЫЯВЛЕНИЯ АТАКУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ GNN-СЕТЕЙ

С.А. Веревкин, Н.А. Трофимова

В статье рассмотрена актуальная задача необходимости формирования признакового пространства для выявления фактов использования эксплойтов, описаны основные подходы к формированию показателей, а также рассмотрены популярные модели, на основе которых основаны современные средства защиты информации. В рамках данной работы, предложена математическая модель, описывающая задачу выявления аномальных воздействий на основе GNN-сетей. Предложенная модель позволяет использовать сформированное ранее признаковое пространство в качестве обучающей выборки для последующего выявления фактов использования вредоносного кода.

Ключевые слова: нейронные сети, защита информации, анализ данных, GNN-сети, кибербезопасность.

Введение. В современном мире, где информационные технологии стали неотъемлемой частью нашей жизни, вопросы информационной безопасности становятся все более актуальными. Гетерогенность современных сетей значительно увеличивает сложность оперативного выявления атакующих воздействий (эксплойтов).

Проблема выявления фактов применения вредоносного кода заключается в том, что эксплоиты часто используются злоумышленниками для взлома систем или получения несанкционированного доступа к данным, что создает серьезную угрозу для безопасности и конфиденциальности информации.

Причина сложности выявления подобных инцидентов заключается в том, в постоянном совершенствовании и модификации исходного кода эксплойтов, с целью обхода существующих средств защиты информации.

Кроме того, эксплоиты могут иметь различные цели и методы их достижения, благодаря чему существуют как распространенные версии вредоносного кода, так и уникальные решения с узкой направленностью.

Традиционные методы обнаружения эксплоитов основываются на сигнатурном анализе, который заключается в сопоставлении сигнатур известных эксплоитов с трафиком или кодом программы. Однако, это может быть неэффективным при обнаружении новых или малоизвестных эксплоитов.

Еще одной проблемой является большое количество ложных срабатываний, возникающих при использовании традиционных методов. Подобный недостаток может вести к перегрузке системы и увеличению затрачиваемых ресурсов.

Кроме того, данные о фактах применения эксплойтов могут быть неструктурированными и неоднородными, что делает их анализ сложным и требует использования специализированных методов и инструментов.

Все эти факторы делают проблему выявления фактов применения эксплоитов актуальной и требующей разработки новых подходов и методов для более эффективного обнаружения и предотвращения эксплоитации систем.

Одним из ключевых аспектов в этом процессе является формирования признакового пространства - совокупности характеристик и атрибутов, которые могут быть использованы для анализа и идентификации потенциальных угроз, связанных с применением вредоносного программного кода. Формирование подходящего признакового пространства требует глубокого понимания природы уязвимостей, способов их эксплуатации, а также особенностей функционирования и защиты информационных систем.

Цель данной статьи - рассмотреть методы и подходы к формированию признакового пространства для выявления фактов эксплуатации уязвимостей, способы их получения, а также использование полученных данных для обучения моделей, способных эффективно обнаруживать угрозы.

Обзор предметной области. Признаковое пространство представляет собой многомерное пространство, каждое измерение которого соответствует одному из признаков. В контексте обнаружения угроз, признаки могут включать такие атрибуты, как признаки входных данных (например, тип и содержание данных), характеристики системы или сети (например, версия ПО, наличие обновлений безопасности) и поведенческие метрики (например, частота и типы операций, ошибки выполнения).

Правильное формирование признакового пространства позволяет сфокусироваться на наиболее релевантных данных, позволяя повысить эффективность работы алгоритмов, в которых оно используется. Обученный алгоритм обнаружения угроз использует веса признаков для классификации новых данных и для предсказания различных типов угроз. Формирование признаков атакующих воздействий состоит из следующих этапов (Рисунок 1):

1) Формирование признаков атакующих воздействий представляет собой Сбор и предварительную обработку исходных данных. Первоначально необходимо собрать данные, которые будут использоваться для определения признаков атакующих воздействий. Данные могут включать в себя:

- Анализ сетевого трафика – позволяет обнаружить аномальные паттерны передачи данных. Например, объем трафика, источник/адрес назначения, используемые порты или протоколы;

- Анализ системных журналов – представляет собой комплексный анализ журналов аудита операционных систем на всех узлах сети. Особое внимание необходимо уделить журналу системных вызовов (System Call Log) и журналу вызова API (API Call Log).

Системные вызовы - специальные функции, предоставляемые операционной системой, которые позволяют приложениям взаимодействовать с системными ресурсами, такими как файлы, сетевое оборудование и оборудование ввода/вывода. Когда приложение делает системный вызов, операционная система забирает контроль, выполняет заданную операцию и возвращает управление приложению. Журнал системных вызовов отслеживает эти вызовы, записывая информацию об их выполнении, включая время вызова, параметры вызова и результаты выполнения, таким образом, отслеживание системных вызовов позволяет выявить нелегитимные действия вредоносного программного обеспечения.

API, или интерфейс программирования приложений, представляет собой набор функций и процедур, которые позволяют взаимодействовать с другими программными модулями. Журнал вызова API отслеживает эти запросы, записывая данные о вызове, включая URL запроса, параметры, тело запроса и ответа, и другую подробную информацию.

- Сбор сведений из открытых источников – содержит всевозможные сведения из открытых источников, включая: черные списки DNS-имен и IP-адресов, тактики, техники и процедуры, используемые злоумышленниками при проведении атакующих воздействий, например, база Mitre ATT&CK и банк данных угроз ФСТЭК.

2) Препроцессинг данных - включает чистку данных (удаление и корректировка отсутствующих или искаженных значений), нормализацию (приведение всех значений к единой шкале), и дискретизацию (преобразование непрерывных значений в дискретные).

- Очистка данных - включает окончательное устранение некорректных, недостающих или шумовых данных для обеспечения качества и целостности исходного набора данных. Например, могут быть удалены или исправлены некорректные записи лог-файлов или сетевых пакетов.

- Нормализация - зачастую признаки имеют различную размерность. Так, например, для использования полученных признаков в алгоритмах машинного обучения, данные должны быть приведены к единому масштабу.

3) Извлечение признаков - идентифицируются и выбираются наиболее релевантные признаки из исходных данных, которые могут помочь в распознавании атак. Этот процесс может включать анализ взаимосвязей между различными признаками и целевыми атаками, а также учет предыдущего опыта и экспертных знаний. При выборе могут использоваться различные методы, такие как статистический анализ, информационные критерии, методы, основанные на машинном обучении.

Также, важную роль играет инжиниринг признаков посредством дополнительной обработки набора для создания новых признаков или преобразования существующих, включая комбинирование нескольких признаков, сегментацию или агрегацию данных, применение математических или статистических функций и т.д.

В качестве примера, рассмотрим уязвимость CVE-2014-0160, более известную как Heartbleed. В соответствии со стандартом Common Vulnerability Scoring System (CVSS) уязвимость является критической и связана с библиотекой OpenSSL, используемой для обеспечения безопасности транспортного уровня в большинстве интернет-сервисов. Пример исходного кода эксплойта уязвимости Heartbleed на Github [1].

Анализируя исходный код эксплойта, можно заметить, что он формирует специфический запрос, искусственно манипулируя размером поля «length» в пакете heartbeat, исходя из этого, метриками для выявления факта применения эксплойта могут быть:

1.Проверка на несоответствие длины heartbeat сообщения соответствует указанному числу байт в поле «length»;

2.Аномально высокое число запросов heartbeat-запросов к серверу от одного клиента;

Анализ содержимого ответа - Heartbleed позволяет злоумышленнику прочитать до 64 КБ памяти сервера, в ответ на один запрос. Если ответ содержит конфиденциальные данные (например, пароли или ключи сессий), это значит, что сервер подвержен уязвимости.

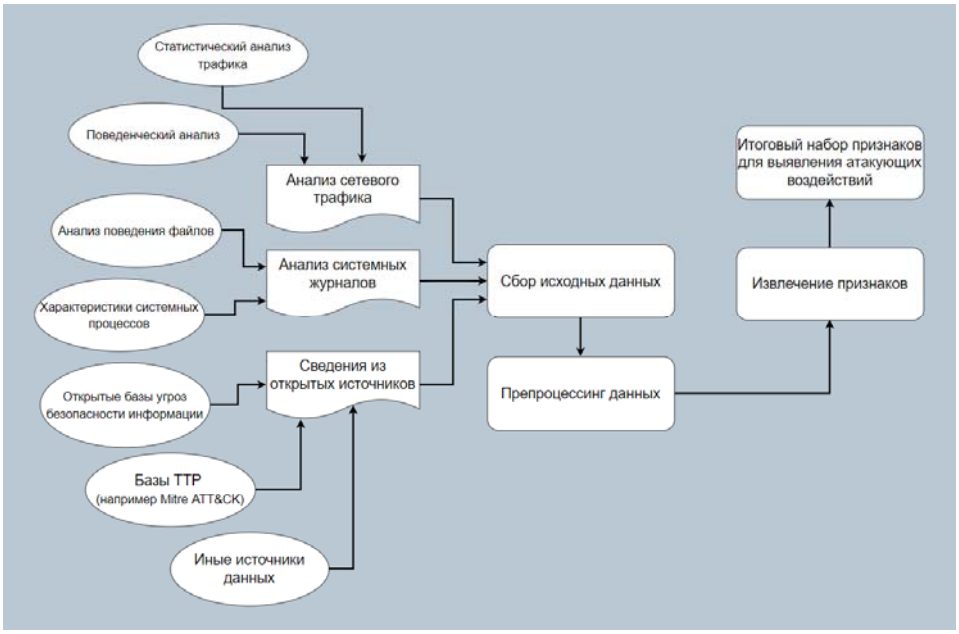


Рис. 1. Схема формирования признакового пространства для выявления атакующих воздействий

Модели для выявления фактов применения эксплойтов. Разнородность данных в признаковом пространстве, влечет за собой возможность использования широкого выбора различных моделей, на основе которых функционируют современные средства защиты информации, среди них:

1) Модель обучения без учителя (Unsupervised Learning): модель основана на анализе неразмеченных данных и использует методы кластеризации, такие как K-means, и методы выявления аномалий, такие как одноклассовые SVM или Isolation Forest, используются для выделения групп похожих данных или поиска аномалий без прямых меток.

2) Модель детекции аномалий (Anomaly Detection): основана на построении «нормального» профиля данных и ищет отклонения от этого профиля. Алгоритмы, такие как Local Outlier Factor (LOF) или Isolation Forest, могут определять аномалии в данных, которые могут быть связаны с вредоносными активностями.

3) Модель временных рядов (Time Series Analysis): временные ряды используются для анализа динамических данных. Методы, такие как авторегрессионные интегрированные скользящие средние (ARIMA) и экспоненциальное сглаживание (Exponential Smoothing), могут помочь предсказать будущие значения и выявить аномалии в изменениях данных с течением времени.

4) Модель графов (Graph-based Models): позволяет моделировать связи между различными сущностями. Алгоритмы поиска подграфов или обнаружения аномалий в графах могут выявлять необычные или незаконные связи, что может указывать на вредоносные активности.

5) Модель байесовских сетей (Bayesian Networks): представляет собой графическую модель, основанную на теории вероятностей. Позволяет моделировать вероятностные зависимости между различными событиями и определять вероятность возникновения различных сценариев атак.

6) Модель марковских цепей (Markov Chains): марковские цепи моделируют последовательность событий, где вероятность каждого события зависит только от предыдущего состояния. Они могут быть использованы для предсказания следующего состояния системы и выявления аномалий в последовательности событий.

7) Модель глубокого обучения (Deep Learning): глубокие нейронные сети, такие как рекуррентные нейронные сети (RNN), сверточные нейронные сети (CNN) и генеративные состязательные сети (GAN), способны обрабатывать сложные данные и выявлять глубокие паттерны в них. Они могут быть использованы для анализа сетевого трафика или обнаружения вредоносных файлов.

В качестве примера, рассмотрим одну из математических моделей глубокого обучения, используемых для выявления активности, связанной с использованием вредоносного кода:

Имеем набор данных, состоящий из информации о файлах, которые нужно классифицировать как "вредоносный" или "не вредоносный" код. Каждый файл представляется в виде вектора, содержащего различные характеристики файла (например, частоты использования определенных инструкций, размеры сегментов кода и т.п.).

Математически задача выглядит следующим образом:

Пусть X - обучающая выборка, состоящая из векторов, описывающих файлы (размерность каждого вектора - n).

Пусть y - вектор меток, где y[i] принимает значение 1, если файл является вредоносным, и 0, если файл не является вредоносным.

Мы можем построить глубокую нейронную сеть с несколькими скрытыми слоями, которая будет обучаться на этих данных с целью классифицировать файлы на вредоносные и не вредоносные. Входные данные для сети будут представлять собой векторы, описывающие каждый файл, а выходной слой будет содержать один нейрон с сигмоидной активационной функцией, предсказывающий вероятность вредоносности файла.

Математическое описание модели:

$$h_1 = relu(W_1 * X + b_1);$$
$$h_2 = relu(W_2 * h_1 + b_2);$$
$$\dots$$
$$h_n = relu(W_n * h_n - 1 + b_n);$$
$$output = sigmoid(W_{output} * h_n + b_{output}),$$

где h_1, ..., h_n - активации скрытых слоев с функцией активации *relu*; W_1, ..., W_n, W_{output} - матрицы весов скрытых слоев и выходного слоя; b_1, ..., b_n, b_{output} - векторы смещений для скрытых слоев и выходного слоя.

Обучение модели осуществляется путем минимизации функции потерь, такой как категориальная кросс-энтропия или бинарная кросс-энтропия, с использованием методов оптимизации, например, стохастический градиентный спуск (SGD) или адаптивный градиентный спуск (Adam).

Представленная модель может быть сложна в реализации, поскольку требует достаточно большого объема обучающих данных и вычислительных ресурсов для обучения. Однако, при правильной настройке и обучении, она может быть эффективным инструментом для выявления активности, связанной с использованием вредоносного кода.

Формирование модели выявления фактов применения эксплойтов на основе графовых нейронных сетей. Анализируя достоинства и недостатки популярных моделей, используемых для выявления фактов применения эксплойтов, рассмотрим возможность формирования собственного подхода к выявлению подобных инцидентов. В качестве примера, рассмотрим модель на основе графовых нейронных сетей (GNN), в рамках которой может быть использован сформированный набор признаков. GNN специально разработаны для работы с графами и позволяют анализировать связи между узлами графа (Рисунок 2.).

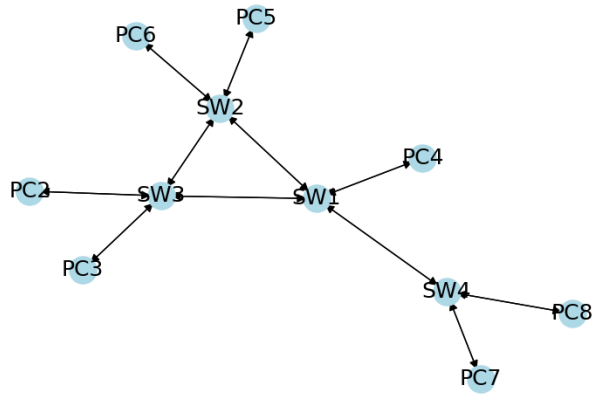


Рис. 2. Пример представления фрагмента сети в виде двунаправленного графа

Рассмотрим основные преимущества GNN:

- GNN-сети позволяют учитывать контекстную информацию при анализе вредоносного кода, давая возможность анализировать связи между различными кодовыми элементами, такими как функции, переменные и операторы, и учитывать их влияние на вероятность того, что код является вредоносным;
- Масштабируемость - возможность работать с большими объемами программного кода и обеспечивать высокую скорость обработки. GNN-сети могут работать с графами кода, состоящими из тысяч или даже миллионов узлов, и обучаться на больших наборах данных;
- Выявление неявных характеристик - GNN-сети могут выявлять не известные ранее характеристики, которые могут указывать на вредоносный код. Например, обнаружение скрытых зависимостей между кодом, которые могут быть учтены для определения его безопасности.

Подход позволяет анализировать атаки, которые могут включать в себя несколько этапов и уязвимостей. GNN позволяет выявлять связи между различными этапами атаки и определять, как они могут быть связаны.

Рассмотрим пример математической модели для описания подхода, использующего глубокое обучение и графовые нейронные сети (GNN):

Представление сети в виде графа:

Пусть $G(V, E)$ - граф, представляющий сеть, где: V - множество узлов (устройств); E - множество рёбер (сетевых соединений).

Признаки узлов и рёбер:

Пусть X_v и X_e обозначают признаки узлов и рёбер соответственно. Каждый узел v имеет свой набор признаков X_v, и каждое ребро e имеет свой набор признаков X_e.

Параметры GNN: Θ - параметры графовой нейронной сети (GNN).

Агрегация признаков на уровне узлов:

Для каждого узла v, GNN выполняет операцию агрегации признаков его соседей, что может быть описано следующим уравнением:

$$\left[h_v^{(l+1)} = AGGREGATE\left(h_v^{(l)} h_u^{(l)}, \forall_u \in (N(v))\right)\right]$$

где $h_v^{(l)}$ - представление узла v после l-й итерации GNN; $(N(v))$ - множество соседей узла v; (l) - текущая итерация.

Обновление представлений узлов: На каждой итерации GNN обновляет представления узлов, учитывая их признаки и соседей.

$$\left[h_v^{(l+1)} = UPDATE(h_v^{(l)}, X_v, h_u^{(l)}, \forall_u \in N(v), \Theta)\right]$$

где $(UPDATE)$ - функция обновления представления узла, зависящая от признаков узла, признаков соседей и параметров GNN.

Функция выявления аномалий: После нескольких итераций GNN, можно использовать представления узлов для выявления аномалий, например, посредством функции сравнения представления узлов с нормальным поведением.

$$\left[AnomalyScore(v) = ANOMALY_DETECTION(h_v^{(L)})\right],$$

где (L) - количество итераций GNN, а $(ANOMALY_DETECTION)$ - функция для определения аномалий.

Обучение GNN: Параметры GNN, обозначенные как Θ, могут быть обучены посредством использования сформированного признакового пространства, которое будет использовано в качестве обучающего набора данных. В дальнейшем, минимизируя функцию потерь, становится возможным настроить параметры GNN для наилучшего выявления аномалий.

Заключение. TBD - модель описывает процесс анализа сетевой активности с использованием GNN и глубокого обучения для выявления использования эксплойтов. Конкретные функции AGGREGATE, UPDATE и ANOMALY_DETECTION могут варьироваться в зависимости от архитектуры GNN и спецификаций задачи.

Список литературы

1.Онлайн-платформа [Электронный ресур] URL: https://github.com/musalbas/heartbleed-masstest/blob/master/ssltest.py (дата обращения: 10.05.2023).

Веревкин Сергей Александрович, аспирант, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,

Трофимова Наталья Андреевна, аспирант, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

ANALYSIS OF METHODS AND APPROACHES FOR THE FORMATION OF A FEATURE SPACE FOR THE DEVELOPMENT OF A MODEL FOR DETECTING ATTACKING INFLUENCES BASED ON GNN NETWORKS

S.A. Verevkin, N.A. Trofimova

The article considers the urgent problem of the need to form a feature space to identify the facts of exploits, describes the main approaches to the formation of indicators, and also considers popular models on the basis of which modern information security tools are based. Within the framework of this work, a mathematical model is proposed that describes the task of detecting anomalous impacts based on GNN networks. The proposed model makes it possible to use the previously formed feature space as a training sample for subsequent identification of the facts of the use of malicious code.

Key words: neural networks, information security, data analysis, GNN networks, cybersecurity.

Verevkin Sergei Alexandrovich, postgraduate, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,

Trofimova Natalia Andreevna, postgraduate, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

УДК 004.8
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-262-263

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ДАННЫХ

М.Н. Квасов, Г.А. Митряев, М.А. Прохоров

В работе исследуется процесс сбора разнородных неструктурированных данных и их последующая обработка. Рассмотрены основные области применения методов обработки естественного языка. Обозначены проблемные вопросы при работе с данными посредствам семантического анализа. Предложена модель семантического анализа и синтеза данных в соответствии с запросом пользователя. При этом учтена возможность получения дополнительной информации (метаданных) из разнородных источников таких, как видео, аудио и графические данные. Предложенная модель может быть использована при разработке программных комплексов, целью которых является сбор и обработка разнородной неструктурированной информации. В дальнейшем в модель могут быть внедрены технологии искусственного интеллекта.

Ключевые слова: семантический анализ; синтез данных; разнородные данные; неструктурированные данные; математическая модель; обработка естественного языка.

Объем информации, генерируемый людьми и различными смарт-устройствами, увеличивается с каждым годом. В 2008 году пользователями глобальной сети интернет сгенерировано 5 эксабайт данных, а в 2022 году этот показатель был достигнут за 1 день. Такой темп связан не только с возросшей доступностью выхода в Интеренет, но и с увеличением использования интернета вещей (IoT). Для работы с таким количеством информации необходимо использовать методы обработки больших данных (Big Data), которые являются достаточно сложными и требуют для решения использования ряда инструментов [1-4]:

– нейросети;
– технология Data Mining;
– машинное обучение;
– стратегия краудсорсинга;
– метод предиктивной аналитики;
– принцип статистического анализа;
– технологии имитационного моделирования;
– метод визуализации аналитических данных;
– метод смешения и интеграции данных.

Использование результатов обработки больших данных для российского потребителя относительно новое направление, которое интенсивно развивается с учетом опыта, полученного западными странами. Так, например, используя методы обработки естественного языка (NLP), входящие в область искусственного интеллекта (AI) можно решить следующие задачи:

– прогнозирование заболеваний пациентов на основе данных из их медицинских карт, речи. Например, Amazon Comprehend Medical изучает действия лекарств, болезненные состояния пациентов, эффективность назначенного лечения по данным цифровых медицинских записей, протоколов клинических испытаний, используя NLP;

– определение отношения клиентов к товару или услуге на основе данных, полученных из социальных сетей, мессенджеров, новостных порталов. При этом маркетологи получают данные о предпочтениях клиентов и факторах, которые оказали влияние на принятие решения. В дальнейшем эта информация используется для отображения персонализированной рекламы и рекомендаций по выбору медиа-контента;

– фильтрация нежелательных писем (спам) и генерация быстрого ответа. Почтовые сервисы на основе NLP анализа осуществляют обработку текста электронного письма и автоматически отфильтровывают часть сообщений до попадания в поле зрения пользователя, а также предлагают быстрые ответы на полученные письма;

– определение подлинности новостных публикаций;

– поиск в интернете по голосовому запросу, управление элементами умного дома, перевод денег. Для решения этих задач используются голосовые интерфейсы такие, как Amazon Alexa, Apple Siri, Яндекс Алиса, Сбер Салют и многие другие;

– создание торговых алгоритмов трейдерами. Обработка данных из новостных источников, отчетов компаний, комментариев инвесторов – все это может быть использовано для синтеза необходимого алгоритма;

– выявление потенциальных клиентов и сотрудников организаций до того, как они станут активными на рынке труда.

Основной проблемой при решении этих задач является необходимость обработки неструктурированных данных. Они могут быть представлены в виде текста с расположенными в произвольном порядке датами, фактами, цифрами; изображений, видео и аудио файлов, имеющих или не имеющих текстового описания своего содержания (метаданные).

Существенная часть информации, являющейся ценной для использования, должна быть представлена в базах знаний в текстовом виде. Для решения задач доступа к необходимым данным, либо получении обобщенной информации, используются методы семантического анализа. Описание существующих подходов представлены в [5-28].

Работы в области семантического анализа данных, как правило, нацелены на обработку исходно текстовой информации, полученной из новостных источников, научных статей, книг и т.п. Некоторые из них принимают во внимание возможность обработки текста, полученного путем распознавания человеческой речи, но пренебрегают временем получения этих данных.

В работе [29] рассмотрена возможность применения подхода семантического описания и онтологии в качестве средства подготовки данных и инструмента распознавания дорожных знаков для помощи водителю при управлении транспортным средством. Однако в представленной онтологической модели рассмотрен только один источник информации (изображение с видеокамер автомобиля) для выполнения единственной функциональной задачи (распознавание дорожных знаков).

Объем генерируемых данных ежегодно возрастает, также растет и потребность получения информации по результатам обработки Больших Данных. Учитывая многообразие неструктурированных данных и их потенциальную ценность, представляется актуальным создание математической модели семантического анализа и синтеза данных, в которой будут учтены аспекты обработки неструктурированных данных. В ходе решения поставленной задачи разработана модель, в которой в отличии от известных, учтена возможность проведения семантического анализа разнородных неструктурированных данных как в исходном текстовом виде, так и полученных после предобработки видео, аудио и графических файлов, а также прикрепленных к ним метаданных. Автоматическая обработка полученный информации позволяет выделить сущности, а последующее проведение семантического анализа выявляет связи между ними, тем самым структурируя данные. Основываясь на принципах индуктивной логики и информации полученной из пользовательского запроса осуществляется процесс синтеза данных для получения дополнительных сведений из данных и более целостной картины.

Семантический анализ данных. Основываясь на анализе работ [30-34] и принципах работы автоматизированных систем обработки данных составлена обобщенная схема работы вопросно-ответной системы (рисунок 1). На входе системы создается запрос пользователя на естественном языке. Далее запрос обрабатывается поисковой системой, которая обращается к базе данных и формирует релевантную выборку. Прежде чем попасть в базу данных вся информация подвергается автоматической обработке. Для текстовой информации это стандартный набор процедур, который может быть применен к имеющимся метаданным графических, видео и аудио файлов. Кроме получения стандартного набора метаданных для перечисленных файлов возможно извлечение дополнительной информации в автоматическом режиме. Например, из аудио и видео файлов может быть получена распознанная речь, которая в дальнейшем будет представлена в виде текстового блока и подвергнута автоматической обработке. Описание графических изображений с помощью средств компьютерного зрения может быть дополнено метаданными о визуально доступной информации. Весь этот набор неструктурированных данных после предварительной обработки подвергается семантическому анализу.

Далее на основе релевантной выборки с учетом выделенных семантических отношений производится синтез данных в соответствии с запросом пользователя и выдача результата.

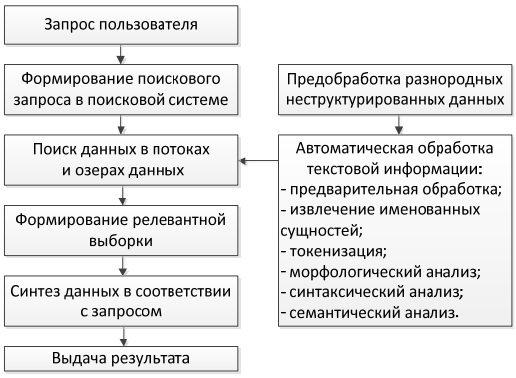


Рис. 1. Обобщенная схема работы вопросно-ответной системы

Ключевыми процессами системы являются семантический анализ и синтез данных. В данном случае задачей анализа является построение семантических отношений $D = \{D_1(s_{1_1}, s_{1_2}), \dots, D_d(s_{d_1}, s_{d_2})\}$, обнаруженным в анализируемом тексте *T*, кортежа синтаксем s_i: $T = [s_1, \dots, s_n]$, где в соответствие каждой синтаксеме s_i ставится множество $p(s_i)$, элементы которого определяют морфологические, онтологические характеристики и название самой синтаксемы. Входные данные при разработке математической модели получаются из множества *T,* выходные из множества *D.*

Поиск элементов множества *D* производится с помощью онтосемантических правил, имеющих вид «если *A*, то *B*». Пусть A — базовый онтосемантический шаблон, Q — очередь на обработку, Reg — множество всех базовых онтосемантических правил, используемых при семантическом анализе:

$$Reg = \{reg_1, \dots, reg_m\},$$

где reg_i – i-ое базовое онтосемантическое правило, представляющее собой кортеж:

$$reg_i = [PT_i, D_i(\alpha_i, \beta_i), del_i, sp_i],$$

где PT_i – кортеж $\left[p(s_i^1), p(s_i^2), \dots, p(s_i^s)\right]$, каждый элемент которого является кортежем из трех элементов:

$$p(s_i^j) = \left[name_i^j, morphP_i^j, ontP_i^j\right],$$

где $name_i^j$ – название слова или синтаксемы s_i^j, а $morphP_i^j$ и $ontP_i^j$ множество морфологических и онтологических характеристик этого слова или синтаксемы соответственно; $D_i(\alpha_i, \beta_i)$ – семантическое отношение D_i, соединяющее 2 узла, определенные кортежами α_i и β_i соответствующих синтаксем или из номеров слов PT_i; del_i – множество порядковых номеров слов или синтаксем из PT_i; sp_i – значение приоритета семантической группы, к которой относится семантическая зависимость S_i.

Математическая модель семантического анализа основана на утверждении, что в анализируемом тексте T производится поиск кортежа подряд идущих синтаксем или слов, коррелирующий с базовым онтосемантическим шаблоном. При совпадении с шаблоном PT_i, создается семантическая зависимость D_i, первый и второй аргументы которой состоят из кортежей синтаксем из T, связанных с порядковыми номерами из кортежей α_i и β_i в PT_i соответственно. Если множество del_i не пустое, в Q добавляется элемент (s_{del_i}, sp_i, $pos(s_{del_i})$), где s_{del_i} – кортеж слов и/или синтаксем из T , связанных в PT_i связанных с элементам из del_i, а $pos(s_{del_i})$ – порядковый номер синтаксемы в T, связанный в PT_i с элементом, порядковый номер которого равен max del_i.

После обнаружения в тексте T всех семантических зависимостей из очереди удаляется элемент с наивысшим приоритетом. В сокращенном на одну синтаксему тексте T осуществляется очередная итерация поиска семантических шаблонов из Reg. Процесс повторяется до полного исчерпания базовых семантических шаблонов в анализируемом тексте.

Пример онтосемантического правила reg_i представлен на рисунке 2, с помощью которого в анализируемом тексте ищется семантическое отношение, где (–) – любой, (г) – глагол, (с) – существительное, (время) – онтологическая характеристика.

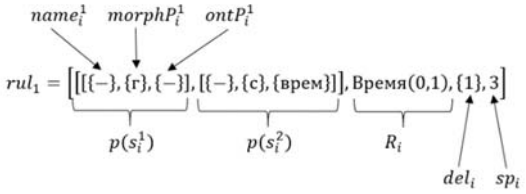


Рис. 2. Пример базового онтосемантического правила

Элементы $p(s_i^j)$) – характеристики слова или синтаксемы s_i^j. Характеристика $p(s_\alpha) = [name_\alpha, morphP_\alpha, ontP_\alpha]$ не противоречит характеристике $p(s_\beta) = [name_\beta, morphP_\beta, ontP_\beta]$ (при этом $p(s_\alpha) \subset p(s_\beta)$), если соответствующие s_α и s_β совпадают или название s_β любое, а морфологические и онтологические характеристики $p(s_\beta)$ содержатся в $p(s_\alpha)$ или не противоречат им:

$$p(s_\alpha) \subset p(s_\beta) \Leftrightarrow \begin{cases} (name_\alpha = name_\beta) \\ \wedge \\ morphP_\alpha \subset morphP_\beta \\ \wedge \\ ontP_\alpha \subset ontP_\beta \end{cases}$$

Для поиска кортежа $[s_j, s_{j+1}, \dots, s_{j+n-1}]$, из n, элементами которого являются подряд идущие синтаксемы из T, совпадающего с базовым семантическим шаблоном $PT_i = [p(s_i^1), p(s_i^2), \dots, p(s_i^s)]$, определена функция In:

$$In(T, PT_i) = \begin{cases} 1, & if\ \exists [s_j, s_{j+1}, \dots, s_{j+n-1}] \in T: p(S_i^\xi) \subset p(s_{j+\xi-1}), \xi \in 1 \dots n \\ 0, & else \end{cases}$$

Для поиска семантических отношений D в тексте T для каждого правила $reg_i = [PT_i, D_i(\alpha_i, \beta_i), del_i, sp_i]$] выполняется проверка на содержание базового онтосемантического шаблона $P\ Ti$ в T. В случае обнаружения шаблон PT_i в T в множество D дополняется семантической зависимостью $D_i(\alpha_i, \beta_i)$, определенной в PT_i с аргументами, а элемент $(s_{del_i}, sp_i, pos(s_{del_i}))$, попадает в очередь Q:

$$(In(T, PT_i) = 1) \Rightarrow \begin{cases} D \cup D_i(s_{i_1}, s_{i_2}) \\ Insert(Q, (s_{del_i}, sp_i, pos(s_{del_i})) \end{cases}$$

В случае опустошения очереди Q поиск семантических отношений D в анализируемом тексте T завершается.

Если в множестве Q имеются элементы, то удаляется элемент q_{max} с наивысшим приоритетом, и из текста T синтаксема, связанная с q_{max}:

$$(isEmpty(Q) = 0) \Rightarrow \begin{cases} Q \backslash q_{max} \\ T \backslash x_1^{max} \end{cases}$$

Выходные данные модели предоставляются сформированным множеством семантических отношений D:

$$\left.\begin{matrix} In(T, PT_i) = 0 \\ \wedge \\ isEmpty(Q) = 0 \end{matrix}\right\} \Rightarrow Return\ D$$

В состав модели синтеза данных в соответствии с запросом пользователя вводятся:

– множество проанализированных текстовых блоков H: $H = \{h_i\}_{i=1}^{n_h}$, где n_h – количество обнаруженных семантических отношений;

– множество взаимосвязанных текстовых блоков W: $W = \{w_i | w_i \subseteq H\}_{i=1}^{n^w}$, где n_w – количество.

При этом в процессе синтеза учитываются функции распределения F_a – тип источника получения информации (текст, видео, аудио или графический файл), $F_n(a_i)$ – количество связанных текстовых блоков относительно их первоисточника. Объем генерируемых данных, исчисляемый в количестве файлов, представляет из себя нестационарный поток. Так, например, доля видеофайлов за прошедшие пять лет кратно возросла. Если рассматривать более короткие промежутки времени, то объем генерируемых пользователями данных того или иного рода может зависеть как от времени года, так и от времени суток. Следовательно, случайная величина a (тип источника) распределена по экспоненциальному закону:

$$F_a = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda a}, a \geq 0 \\ 0, \quad a < 0 \end{cases}.$$

В свою очередь количество связанных текстовых блоков как правило будет иметь нормально распределение:

$$F_n(a_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\mu}} e^{\left(-\frac{(a-x)^2}{2\sigma^2}\right)}.$$

С учетом указанных данных модель синтеза данных по запросу пользователя описывается выражением:

$$M = \langle H, W, F_a, F_n \rangle$$

Заключение. Предложенная математическая модель семантического анализа и синтеза данных может

быть использована при разработке программных комплексов, целью которых является сбор и обработка разнородной неструктурированной информации с последующим проведением анализа с использованием технологий искусственного интеллекта. Стоит отметить, что предварительная обработка разнородных данных, представленными видео, аудио и графическими файлами, требует значительных вычислительных ресурсов, следовательно получение ответа на пользовательский запрос при ограниченности вычислительного ресурса может занять длительное время. Дальнейшим направлением исследований может стать вопрос определения вычислительной сложности семантического анализа и синтеза данных и влияние этого показателя на оперативность предоставления ответа на запрос.

Список литературы

1. Кубасов И.А., Лекарь Л.А., Кондрущенков О. М. Перспективные направления применения методов анализа больших данных в информационно-аналитическом обеспечении оперативно-разыскной деятельности // Стратегическое развитие системы МВД России: состояние, тенденции, перспективы: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Москва, 23 октября 2020 года. Москва: Академия управления Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2020. С. 436-442.

2. Hagn K., Grau O. (2022) Optimized Data Synthesis for DNN Training and Validation by Sensor Artifact Simulation. Deep Neural Networks and Data for Automated Driving, pp. 127–147.

3. Averkin A., Yarushev S. (2020) Neural networks in semantic analysis. Dorondnicyn Computing Centre (electronic journal). Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=43856160 (accessed 13 October 2022) (in Russian).

4. Рябушев С. А., Бабушкин Д. А. Исследование и анализ различных методов машинного обучения для решения задачи семантического анализа // Научные исследования молодых учёных: сборник статей XIX Международной научно-практической конференции, Пенза, 27 июля 2022 года. Пенза: Наука и Просвещение, 2022. С. 81-86.

5. Foltz P., Kintsch W., Landauer T. (2009) The Measurement of Textual Coherence With Latent Semantic Analysis. Discourse Processes (electronic journal). Available at: DOI: 10.1080/01638539809545029.

6. Kishenova A., Tazhibaeva S., Kabanova A. (2021) Cognitive-semantic Approach to text analysis in the Russian language picture of the world. Eurasian Union of Scientists (electronic journal). Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=44910644 (accessed 13 October 2022) (in Russian).

7. Landauer T., Foltz P., Laham D. (1998) An Introduction to Latent Semantic Analysis Discourse Processes. Discourse Processes (electronic journal). Available at: DOI: 10.1080/01638539809545028.

8. Mikhailova G. I., Solopova I. D. (2021) Semantic analysis of the British buildings' names. Science and society: materials of the XVI All-Russian scientific-practical conference with international participation, Novosibirsk, 17 March 2022. P. 66-69.

9. Potaraev V. (2020) Analysis of relation types in semantic network used for text classification. Open semantic technologies for designing intelligent systems, no 4. P. 305-308. (in Russsian).

10. Potaraev V. (2020) Analysis of relation types in semantic network used for text classification. Open semantic technologies for designing intelligent systems (electronic journal), no 4. P. 305-308.

11. Purtov D., Sidorkina I. (2020) An approach combining general and highly specialized semantic analysis in DLP systems. Open semantic technologies for designing intelligent systems (electronic journal).

12. Purtov D., Sidorkina I. (2020) An approach combining general and highly specialized semantic analysis in DLP systems. Open semantic technologies for designing intelligent systems, no. 4., P. 301-304.

13. Rehder B., Schreiner M., Wolfe M. (1998) Using Latent Semantic Analysis to Assess Knowledge: Some Technical Considerations. Discourse Processes (electronic journal). DOI: 10.1080/01638539809545031.

14. Stroy O.A. (2019) Basic methods of semantic analysis. Youth. Society. Modern science, technologies & innovations (electronic journal).

15. Vorobiev V., Rovbo M. (2019) Analysis of Semantic Probabilistic Inference Control Method in Multiagent Foraging Task. Open semantic technologies for designing intelligent systems, no 3. P. 237-242.

16. Wang D., Ma X., Yang X. (2022) TL-GAN: Improving Traffic Light Recognition via Data Synthesis for Autonomous Driving. Available at [Электронный ресурс] URL: https://deepai.org/publication/tl-gan-improving-traffic-light-recognition-via-data-synthesis-for-autonomous-driving (accessed 11 October 2022).

17. Wolfe M., Schreiner M., Rehder B. (1998) Learning from text: Matching readers and texts by latent semantic analysis. Discourse Processes (electronic journal). DOI: 10.1080/01638539809545030.

18. Алетдинова А. А., Капелюк З. А., Корицкий А. В. Анализ покупательского поведения населения на основе семантического анализа запросов пользователей // Вестник Алтайской академии экономики и права, 2022. С. 11-16.

19. Багаев И. В., Васенина М. С., Кудрявцев П. А. Кластеризация и семантический анализ записей в социальных сетях // Общество. Наука. инновации (НПК-2017): сборник статей, 2017.

20. Гавриленко А. В. Применения методов семантического анализа текста и методов машинного обучения для анализа тональности финансовых новостных сообщений // МНСК-2022: Материалы 60-й Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 10–20 апреля 2022 года. Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2022. С. 141.

21. Галаганова С. Г., Кравец П. С. Субъективное семантическое пространство человека в условиях цифровой трансформации общества // Человеческий капитал, 2022. С. 159-172.

22. Диковицкий В. В. Семантический анализ текста с применением нейросетевого анализа морфологии и синтаксиса // Труды Кольского научного центра РАН, 2017. С. 109-115.

23. Воронин В. М., Курицин С. В., Наседкина З. А., Ицкович М. М. Использование латентного семантического анализа как альтернативы пропозиционального анализа в исследованиях понимания текста // Гуманизация образования, 2017. С. 11-19.

24. Комарова А. В., Менщиков А. А., Полев А. В., Гатчин Ю. А. Метод автоматизированного извлечения адресов из неструктурированных текстов // International Journal of Open Information Technologies, 2017. С. 21-27.

25. Багаев И. В., Васенина М. С., Кудрявцев П. А. Кластеризация и семантический анализ записей в социальных сетях. Научно-практическая конференция, Киров, 01–29 апреля 2017 года. Киров: Вятский государственный

университет, 2017. С. 670-675.

26. Огарок А. Л. Математическая модель процесса семантической обработки текстовой информации. Информатизация и связь, 2021. С. 87-91.

27. Селенина А. Л. Методика анализа семантических аспектов информационной безопасности личности // Вестник науки и образования, 2020. С. 52-56.

28. Хобсон Л., Ханнес Х., Коул Х. Обработка естественного языка в действии: практическое руководство. Санкт-Петербург: Питер, 2020. С. 576.

29. В. А. Маслов, С. М. Соколов, Обработка семантических запросов в среде Protege на примере построения онтологии дорожных знаков, Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018. 260 с.

30. Ширинкина Е. В. Развитие человеческих ресурсов на этапе развития цифровых технологий: семантический анализ // Экономика: вчера, сегодня, завтра, 2018. С. 279-287.

31. Михалева М.Ю., Орлова И.В. Математическое моделирование и количественные методы исследований в менеджменте. М.: Вузовский учебник, 2019. С. 320.

32. Квасов М. Н. Практические рекомендации по обеспечению устойчивости функционирования автоматизированных систем специального назначения критически важными объектами в условиях деструктивных информационных воздействий / М. Н. Квасов, А. П. Криков, М. А. Прохоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 6. С. 14-21.

33. Мосин Д. А. Методологический подход к совершенствованию автоматизированных систем управления сложными организационно - техническими системами специального назначения на основе внедрения технологий искусственного интеллекта / Д. А. Мосин, А. Ю. Цветков, М. А. Прохоров // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 11-12(161-162). С. 3-14.

32. Горлач Б.А., Шахов В.Г. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2018. С. 292.

33. Яглом И.М. Математические структуры и математическое моделирование. М.: Ленанд, 2018.

Квасов Михаил Николаевич, канд. техн. наук, начальник лаборатории, kvasov_mn@mail.ru, Россия, Анапа, Военный инновационный технополис «ЭРА»,

Митряев Геннадий Андреевич, канд. техн. наук, начальник лаборатории, gmitryaev@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Прохоров Михаил Александрович, канд. техн. наук, главный эксперт, Россия, Москва, Военно-научный комитет Вооруженных Сил Российской Федерации

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL SEMANTIC ANALYSIS AND DATA SYNTHESIS

M.N. Kvasov, G.A. Mitryaev, M.A. Prokhorov

The paper examines the process of collecting heterogeneous unstructured data and their subsequent processing. The main areas of application of natural language processing methods are considered. Problematic issues are identified when working with data through semantic analysis. A model of semantic analysis and synthesis of data in accordance with the user's request is proposed. At the same time, the possibility of obtaining additional information (metadata) from heterogeneous sources such as video, audio and graphic data is taken into account. The proposed model can be used in the development of software complexes, the purpose of which is to collect and process heterogeneous unstructured information. In the future, artificial intelligence technologies can be introduced into the model.

Key words: semantic analysis; data synthesis; heterogeneous data; unstructured data; mathematical model; natural language processing.

Kvasov Mikhail Nikolaevich, candidate of technical sciences, head of the laboratory, kvasov_mn@mail.ru, Russia, Anapa, Military innovative technopolis "ERA",

Mityaev Gennady Andreevich, candidate of technical sciences, head of the laboratory, gmit-ryaev@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky,

Prokhorov Mikhail Aleksandrovich, candidate of technical sciences, chief expert, Russia, Moscow, Military Scientific Committee of the Armed Forces of the Russian Federation

УДК 004.934.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-267-268

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ТРАНСКРИПЦИЯ МЕЛОДИКИ РЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЗЫКАЛЬНОЙ НОТАЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКОМ ВЫСОТЫ ЗВУКА

И.Н. Трифонов, А.В. Копылов

В музыкальной практике существует задача представления речи в музыкальной нотации. В статье предложен алгоритм получения просодической транскрипции в музыкальной нотации. Предложенный нами алгоритм отличается от существующих тем, что в нём учитываются особенности восприятия звука человеком. Полученные результаты могут использоваться при написании музыки, для изучения взаимосвязи речи и музыки, а также для исследования речи.

Ключевые слова: просодическая транскрипция, мелодика речи, частота основного тона речи, музыкальная нотация, особенности восприятия звука человеком.

Введение. В системах автоматического анализа человеческой речи большое внимание уделяется невербальному содержанию, позволяющему судить об эмоциональном состоянии и индивидуальных особенностях говорящего. В то же время музыка является одним из направлений искусства, наиболее тонко и точно отражающего особенности эмоционального восприятия человеком окружающего мира от достаточно кратковременных и интенсивных эмоциональных процессов, таких как аффекты, до более длительных, таких как чувства и настроения. Проблема взаимосвязи речи и музыки вызывает интерес как с точки зрения психологии, лингвистики и анализа речи, так и с точки зрения сочинения и изучения музыки [1].

Речевой сигнал имеет ряд базисных характеристик, которые соответствуют свойствам музыкального звука — высота, сила и протяжённость. Это делает возможным запись речи в музыкальной нотации. Рассматривая возможность использования музыкальной системы в анализе речи, необходимо отметить, что стилизованное представление речи в музыкальной системе, называемое речитативом, известно давно. Речь в музыкальной нотации представляли как композиторы Бах, Бетховен, Яначек, Шёнберг, так и исследователи Джошуа Стил, Роман Якобсон и другие.

Таким образом, в музыкальной практике существует задача представления речи в музыкальной нотации. Она сводится к преобразованию исходного речевого сигнала в нотную запись. Такое преобразование может быть выполнено разными способами, как человеком на основе слухового анализа, так и с использованием автоматизированных технических средств. Отметим, что эту задачу можно рассматривать как частный случай просодической транскрипции. Для того, чтобы дать определение просодической транскрипции, рассмотрим понятие просодических характеристик.

Под просодическими характеристиками будем понимать особенности произношения, дополнительные по отношению к основной артикуляции звуков речи и не выделяющиеся при членении речи на фонемы. Совокупность соответствующих звуковых (фонетических) средств называют просодическими средствами языка. Элементарные (базисные) просодические средства языка соответствуют основным акустическим признакам звука: протяжённости, силе и высоте. Просодические средства языка образуют просодические системы, важнейшие из которых — слоговой тон, словесное ударение и фразовая интонация [2].

Важнейшим элементом просодии является система изменений относительной высоты тона речи, называемая речевой мелодией или мелодикой речи. Мелодика речи — один из основных фонетических параметров, образующих базу интонационных конструкций во всех языках мира [2]. В фонетическом отношении тон есть акустический коррелят физиологического действия — колебания голосовых связок, создающего эффект так называемого основного голосового тона [3].

Полезным инструментом изучения просодических характеристик, в том числе речевой мелодики, является просодическая транскрипция. Под транскрипцией будем понимать графическую фиксацию звуковых характеристик речи. Использование просодической транскрипции в различных исследованиях (например, [4]) и в образовании (например, [5]) подтверждает её необходимость.

Пит Мертенс (2004), в зависимости от подхода к интерпретации просодических характеристик, выделяет три основных типа просодической транскрипции:

1) Символьная транскрипция, в которой используется конечный набор дискретных символов. Эти символы выбираются для обозначения аспектов просодии, которые, как предполагается, имеют отношение к языковой коммуникации. Количество и характер символов зависят от модели, что приводит к транскрипции, специфичной для конкретной модели.

2) Транскрипция, основанная на акустических характеристиках речи, таких, например, как частота основного тона. В такой транскрипции кривую основного тона сопоставляют с последовательностью звуков речи.

3) Транскрипция, выполненная с помощью слухового анализа. Такая транскрипция отнимает много времени, для её осуществления необходима развитая способность отслеживать на слух изменения высоты звука, характерная для музыкантов. Однако именно такая транскрипция отражает особенности слухового восприятия человека [6].

Представление речи в музыкальной нотации можно рассматривать как частный случай просодической транскрипции. Музыкальная нотация позволяет записывать все характеристики звука, соответствующие базисным просодическим средствам языка, хотя и имеет специфику, соответствующую сложившейся музыкальной практике. Музыкальная нотация была выработана в течении многовековой истории музыки, и поэтому отражает особенности восприятия человека и является удобным способом фиксации характеристик звука. Запись мелодики речи в музыкальной нотации позволяет изучать взаимосвязь речи и музыки [7].

В данной статье рассматривается автоматическая транскрипция мелодики речи с использованием музыкальной нотации на основе модели восприятия человеком высоты звука.

Анализ существующих решений транскрипции мелодики речи с использованием музыкальной но-

тации. Методика осуществления просодической транскрипции в музыкальной нотации с использованием современных технологий представлена в [8] (2017) (предыдущая версия работы этих авторов представлена в [9] (2016)). В работе [8] музыкальная система расширена до четвертитоновой, то есть октава делится на 24 равных четвертитона, в отличие от традиционной музыкальной системы, где октава делиться на 12 полутонов. Чтобы разделить шкалу на 24 тона, используется формула $f = f_0 \cdot \sqrt[24]{2^i}$, где f — вычисляемая частота, f_0 — первая нота шкалы, а i — одна из нот шкалы. Аудиозапись речи разделяется на гласные единицы, для чего используется плагин BeatExtractor пакета Praat. Для каждой гласной единицы с помощью скрипта f0.praat вычисляется среднее значение частоты. Сравнивая эту частоту с дискретными значениями частот в четвертитоновой системе, получают запись мелодики речи в музыкальной нотации. Также учитывается длительность и интенсивность звука.

Отметим, что использование деления октавы на 24 части вместо 12 не изменяет принципиально алгоритма просодической транскрипции. Меняется лишь набор значений частот, которыми аппроксимируются исходные значения частоты основного тона.

Для анализа работы данного алгоритма была записана короткая фраза: «Стали дни короче». Полученная транскрипция в музыкальной нотации представлена на рис. 1. Нами использовано деление октавы на 12 частей, так как это не является принципиальным с точки зрения нашей работы.

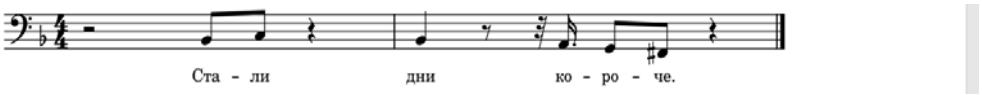


Рис. 1. Транскрипция в музыкальной нотации, выполненная с использованием алгоритма, предложенного в [8]

Заметим, что эта транскрипция визуально воспринимается легко, и любой музыкант без труда сможет сыграть это на том или ином музыкальном инструменте.

Согласно приведённой нами ранее классификации, такая просодическая транскрипция является транскрипцией, основанной на акустических характеристиках речи, так как основана на значениях частоты основного тона. Но эта транскрипция отчасти учитывает и особенности восприятия человеком звука, так как учитывает перцептивное разделение на слоги, происходящее при восприятии человеком звучащей речи. Эти особенности учитываются не в полной мере, поэтому нами был разработан алгоритм транскрипции мелодики речи с использованием музыкальной нотации, основанный на модели восприятия высоты звука человеком. Этот алгоритм будет описан ниже, после обзора особенностей восприятия звука человеком.

Особенности восприятия звука человеком. Существует несколько особенностей восприятия человеком звука, из-за которых контур частоты основного тона (ЧОТ) речи, хотя и является точным физическим описанием речевого сигнала, не является наиболее точным представлением мелодики речи в том виде, в каком она воспринимается человеком.

Обработка слуховой системой отличается от спектрального анализа или определения высоты тона, используемых при цифровой обработке сигналов. В ходе эмпирических исследований установлено, что восприятие высоты тона в речи подвержено нескольким перцептивным преобразованиям (преобразованиям восприятия). Одним из них является перцептивное разделение контура ЧОТ на единицы размером со слог из-за быстрых спектральных и амплитудных колебаний речевого сигнала. Второе —временная интеграция ЧОТ внутри слога, которая состоит в том, что, если контур ЧОТ внутри слога короткий и имеет относительно небольшие изменения, слушатели воспринимают одну высоту тона, представляющую собой средневзвешенное по времени значение ЧОТ внутри слога. Если величина изменения ЧОТ внутри слога превышает некоторый «порог глиссандо», то воспринимается скольжение (или несколько скольжений) [6, 10].

В [6] (2004) описывается система транскрипции просодии, основанная на моделировании восприятия человеком высоты звука, в качестве базовой единицы используется слоговое ядро. Предлагается называть такую транскрипцию «просограммой» по аналогии с осциллограммой и спектрограммой. Просограмма состоит из двух частей: (1) контура воспринимаемой высоты тона и (2) одной или нескольких аннотаций, выровненных по времени (фонетическая транскрипция, текст и др.).

Связь между свойствами акустических стимулов и их влиянием на слуховое восприятие изучает психоакустика. Было замечено несколько явлений, связанных с восприятием высоты тона в речи [6, 11]:

1. Чтобы изменение частоты основного тона было слышно, оно должно превышать некоторое минимальное значение, которое было названо «порогом глиссандо». Порог глиссандо зависит от начальной частоты и продолжительности стимула — он меньше для более длительных стимулов. Пауза после стимула также снижает порог глиссандо. Для линейных изменений частоты (график — прямая) в результате психоакустических экспериментов было получено значение порога глиссандо $G = 0{,}16/T^2$ пт/с, где T — время изменения, а G измеряется в полутонах в секунду (полутон — соотношение частот $1/\sqrt[12]{2}$). В [6] принято значение $DG = 0{,}32/T^2$ пт/с.

2. Изменения частоты основного тона в естественной речи редко бывают линейными, поэтому был введён «дифференциальный порог изменения высоты тона». Дифференциальный порог изменения высоты тона — это минимальная разница в наклоне, необходимая для различения двух последовательных линейных отрезков изменения частоты основного тона. Дифференциальный порог изменения высоты тона предлагается определить как $DG = |g_2 - g_1|$, где g_1 и g_2 указывают наклон линейных отрезков (в пт/с) по обе стороны от точки сопряжения отрезков. Было установлено, что дифференциальный порог изменения высоты тона составляет примерно от 12 до 40. В [6] принято значение $DG = 20$ пт/с.

3. Контур частоты основного тона следует интерпретировать не изолированно, а в сочетании с другими фонетическими и просодическими характеристиками речевого сигнала. Одно и то же движение ЧОТ будет восприниматься либо как скольжение высоты тона, либо как два уровня тона в зависимости от его расположения относительно границ слога. Таким образом, уже на ранней стадии восприятия речи происходит перцептивная сегментация сигнала на слоговые фрагменты, обусловленная изменениями амплитуды и спектра при переходе от одного звука речи к другому. Гласные звуки характеризуются относительной спектральной стабильностью, поэтому гласный звук образует слоговое ядро.

В алгоритме автоматической стилизации контура ЧОТ [11] названные выше особенности учтены в обратном порядке. Во-первых, производится сегментация звукового потока на слоги. Затем контур ЧОТ разделяется на последовательность тональных сегментов. Под тональным сегментом понимается участок изменения ЧОТ, для которого воспринимаемая высота тона имеет равномерный наклон (сохранение одного уровня, или равномерное повышение, или равномерное понижение). Наконец, изменения ЧОТ каждого тонального сегмента сравниваются с порогом глиссандо, и, если изменения слышны, сегменту присваиваются два целевых значения ЧОТ (динамический сегмент), если не слышны — одно (статический сегмент). Для статических тональных сегментов целевые значения устанавливаются равными ЧОТ в конце сегмента. Для восходящего и нисходящего сегментов двумя целевыми значениями являются значения ЧОТ в начале и конце тонального сегмента.

Для разделения контура ЧОТ на последовательность тональных сегментов производится следующая процедура. Между значениями ЧОТ в начале и конце временного окна проводится прямая линия. Точка, наиболее удалённая от этой линии, является потенциальной границей тонального сегмента. Если разница в наклоне между двумя отрезками — от начала временного окна до точки потенциальной границы и от этой точки до конца окна — превышает дифференциальный порог изменения высоты тона, то окно разделяется на два потенциальных тональных сегмента. Эта процедура выполняется рекурсивно для каждого потенциального тонального сегмента до тех пор, пока изменения наклона не перестанет превышать дифференциальный порог.

Транскрипция мелодики речи с использованием музыкальной нотации на основе модели восприятия высоты звука человеком. Отметим, что в приведённом выше алгоритме [8] получения транскрипции в музыкальной нотации учтена только первая из названных в предыдущем разделе особенностей, в связи с чем нами предложен алгоритм транскрипции мелодики речи с использованием музыкальной нотации на основе модели восприятия человеком высоты звука. Он основан на приведённом выше алгоритме стилизации контура ЧОТ, при этом статические сегменты будут представлены в транскрипции одной нотой, а динамические — последовательностью нот.

Предложенный алгоритм транскрипции мелодики речи с использованием музыкальной нотации на основе модели восприятия высоты звука человеком состоит из следующих шагов:

1. Определить частоту основного тона для исходного аудиосигнала. Контур частоты основного тона обозначим как $f_0(t)$, $t = t_0, \dots, t_{n-1}$, где t_i — значение времени в точке отсчёта, $i = 0, \dots, n-1$, а n — число отсчётов сигнала.

2. Определить границы слогов в исходном аудиосигнале. В результате выполнения этого шага получаем множество: $\{[\tau_0, \tau_1], [\tau_2, \tau_3], \dots, [\tau_{2N-2}, \tau_{2N-1}]\}$, где τ_i — время начала или конца слога, $i = 0, \dots, 2N-1$, а N — число слогов.

3. Каждый слог разбить на тональные сегменты. Для этого сначала рассматриваем временное окно, соответствующее слогу.

Временное окно определяется начальным и конечным значениями времени $[t_k, t_l]$, где k и l — номера отсчётов, соответствующих границам временного окна. Далее выполняется поиск потенциальной границы тонального сегмента, которая находиться в точке $t_{j_{max}}$, где:

$$j_{max} = \underset{j}{\operatorname{argmax}} \left(\left[\frac{f_0(t_l) - f_0(t_k)}{t_l - t_k} (t_j - t_k) + f_0(t_k) - f_0(t_j) \right]^2 \right),$$

где $j = k, k+1, \dots, l$.

Если

$$\left| \frac{\log_{12\sqrt{2}} \left(\frac{f_0(t_{j_{max}})}{f_0(t_k)} \right)}{t_{j_{max}} - t_k} - \frac{\log_{12\sqrt{2}} \left(\frac{f_0(t_l)}{f_0(t_{j_{max}})} \right)}{t_l - t_{j_{max}}} \right| > DG,$$

где DG — дифференциальный порог изменения высоты тона, то окно разделяется на два потенциальных тональных сегмента. Далее каждый тональный сегмент рассматривается как временное окно, и эта процедура выполняется рекурсивно до тех пор, пока изменения наклона не перестанет превышать дифференциальный порог.

В результате этого шага для каждого слога получаем множество: $\{[s_0, s_1], [s_2, s_3], \dots, [s_{2m-2}, s_{2m-1}]\}$, где s_i — время начала или конца тонального сегмента, $i = 0, \dots, 2m-1$, а m — число тональных сегментов в слоге.

4. Определить, какие сегменты являются статическими, какие — динамическими. Сегмент $[s_k, s_l]$ является динамическим при условии:

$$\left| \frac{\log_{12\sqrt{2}} \left(\frac{f_0(s_l)}{f_0(s_k)} \right)}{s_l - s_k} \right| \geq \left| \frac{D}{(s_l - s_k)^2} \right|,$$

где D — порог глиссандо.

5. Статическим тональным сегментам поставить в соответствие одну, динамическим — несколько нот.

Транскрипция, полученная с использованием нашего алгоритма, представлена на рисунке 2.

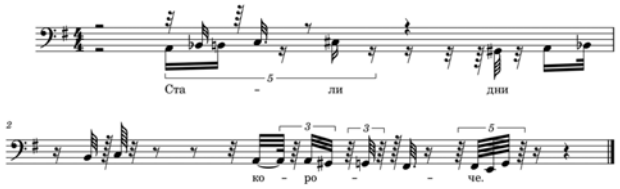


Рис. 2. Транскрипция, полученная с использованием алгоритма транскрипции мелодики речи с использованием музыкальной нотации на основе модели восприятия человеком высоты звука

Легко заметить, что полученная нотная запись отражает существенно больше нюансов изменения частоты основного тона исходного аудио. Но оценить соответствие восприятию человека сложнее, чем соответствие акустическим характеристикам исходного сигнала.

Результаты экспериментов. Для сравнения транскрипций, выполненных с использованием алгоритма, предложенного в [8], и транскрипций, выполненных с использованием предложенного нами алгоритма, нами был использован метод безэталонной экспертной оценки. Экспертам предлагалось прослушать исходное аудио с записью человеческой речи и два варианта транскрипции. В качестве исходных аудиозаписей было использовано 20 фрагментов из четырёх аудиокниг, находящихся в свободном доступе на сайте https://bibe.ru/. Две из них озвучены мужчинами, две — женщинами. Оценку производили четверо экспертов, двое из которых имеют музыкальное образование (музыканты), а двое — не имеют (не музыканты). Результаты экспериментов представлены в таблица. Буквой «а» обозначена транскрипция, полученная с помощью алгоритма, описанного в [8], буквой «б» — с помощью алгоритма, предложенного нами. В таблице указывается транскрипция, выбранная экспертом как лучше передающая мелодику речи (контур ЧОТ) голоса.

Результаты экспериментов

номер эксперимента			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
эксперты	не муз.	1	**б**	**б**	**б**	а	а	**б**	**б**	**б**	**б**	а	а	а	**б**	а	**б**	а	а	**б**	а	а
		2	**б**	а	а	а	а	**б**	**б**	**б**	а	а	**б**	**б**	**б**	**б**	**б**	а	**б**	**б**	**б**	**б**
	муз.	3	а	**б**	а	а	**б**	**б**	а	**б**	а	а	**б**	**б**	**б**	**б**	а	**б**	**б**	**б**	**б**	а
		4	а	**б**	а	а	а	**б**	**б**	**б**	**б**	**б**	**б**	**б**	а	**б**	**б**	**б**	**б**	**б**	а	**б**

Анализ результатов экспериментов показывает, что транскрипция, полученная с помощью алгоритма, предложенного нами, лучше передаёт мелодику речи (контур ЧОТ) в 61,25% случаев. Причём, по оценке не музыкантов, в 57,5%, а по оценке музыкантов — в 65%.

Таким образом, полученные в ходе экспериментов транскрипции мелодики речи с использованием музыкальной нотации на основе модели восприятия человеком высоты звука по результатам безэталонной экспертной оценки показали лучшее соответствие полученной нотной записи восприятию человека.

Хотя эта транскрипция лучше соответствует восприятию звука человеком, визуально она читается с трудом. Музыкальный ритм здесь получен прямым переводом фактической длительности слогов в музыкальную запись с заданным темпом и размером, поэтому визуальное чтение такого ритма вызывает существенные трудности. В дальнейшем запись ритма тоже должна быть выполнена с учётом особенностей восприятия человеком ритма.

Заключение. Предложенная нами транскрипция основана на акустических характеристиках речи, но учитывает особенности восприятия человеком высоты звука. Алгоритм, позволяющий также учитывать и особенности восприятия человеком ритма, является предметом дальнейшей разработки и исследования.

Полученные результаты могут использоваться композиторами для анализа мелодики речи при написании мелодии к тексту или речитатива, а также исследователями для изучения взаимосвязи речи и музыки. Предложенный алгоритм просодической транскрипции может использоваться и для исследования речи. Использование музыкальной нотации даёт компактной описание характеристик речи, что может дать эффективную реализацию алгоритмов анализа эмоционального состояния или идентификации диктора, а также синтеза речи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания FEWG-2021-0012.

Список литературы

1. Музыка и речь [Электронный ресурс] URL: https://nsportal.ru/user/1106064/page/muzyka-i-rech (дата обращения: 05.12.2023).

2. Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс] URL: https://bigenc.ru (дата обращения: 23.03.2023).

3. Лингвистический энциклопедический словарь / Науч.-ред. совет изд-ва «Сов. энцикл.», Ин-т языкознания АН СССР]; Гл. ред. В. Н. Ярцева. М.: Сов. энцикл., 1990. 682 с.

4. Петрова Н.Э. Современные принципы описания интонационной системы (на материале русского и английского языков) // Балтийский гуманитарный журнал. 2019. Т. 8. № 3(28) С. 331-335.

5. Русская интонация: учебное пособие по фонетике для иностранных студентов и стажёров филологических специальностей / Авт.-сост. И. А. Садыкова. Изд-во Казан. ун-та, 2015. 64 с.

6. Piet Mertens. The Prosogram: Semi-Automatic Transcription of Prosody Based on a Tonal Perception Model // Speech Prosody, 2004 Nara, Japan, March 23-26, 2004.

7. Трифонов И.Н. Просодическая транскрипция как инструмент анализа речи / И. Н. Трифонов, А. В. Копылов // XVII Региональная магистерская научная конференция (25 – 29 апреля 2022 года): сб. докладов. В 2 ч. Ч. I / под научной редакцией канд. техн. наук, доц. О.А. Ткач. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. 273 с.

8. Alexsandro R. Meireles, Antônio R. M. Simões, Antonio Celso Ribeiro, Beatriz Raposo de Medeiros (2017) Musical Speech: a New Methodology for Transcribing Speech Prosody // INTERSPEECH 2017. C. 334-338.

9. A. Simões and A. R. Meireles. “Speech Prosody in Musical Notation: Spanish, Portuguese and English,” in Proceedings of the 8th International Conference on Speech Prosody, Boston, USA, 2016.

10. Aniruddh D. Patel An Empirical Method for Comparing Pitch Patterns in Spoken and Musical Melodies: A Comment on J.G.S. Pearl’s “Eavesdropping with a Master: Leos Janáchek and the Music of Speech” // Empirical Musicology Review Vol. 1, No. 3, 2006. C. 166-169.

11. d’Alessandro C., Mertens, P. Automatic pitch contour stylization using a model of tonal perception. Computer Speech and Language, 1995. 9(3). P. 257-288.

Трифонов Иван Николаевич, магистрант, ivan14trifonov@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Копылов Андрей Валериевич, канд. техн. наук, доцент, andkopylov@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

AUTOMATIC TRANSCRIPTION OF SPEECH MELODY USING MUSICAL NOTATION BASED ON HUMAN PITCH MODEL PERCEPTION

I.N. Trifonov, A.V. Kopylov

In musical practice, there is a task of presenting speech in musical notation. The article proposes an algorithm for obtaining prosodic transcription in musical notation. The algorithm proposed by us differs from the existing ones in that it takes into account the peculiarities of human perception of sound. The results obtained can be used when writing music, to study the relationship between speech and music, as well as for speech research.

Key words: prosodic transcription, speech melody, frequency of the basic tone of speech, musical notation, features of human perception of sound.

Trifonov Ivan Nikolaevich, master's, ivan14trifonov@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Kopylov Andrey Valerievich, candidate of technical sciences, docent, andkopylov@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 62.519
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-271-272

СИНХРОНИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ АГЕНТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР В СЛУЧАЕ КВАЗИТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ*

Э.А Гейс, О.О. Морозов, А.В. Козырь

В работе предложено решение задачи формирования геометрических структур (задачи формации) для роя, функционирующего по методу квазитеплового движения агентов. Задача решена путем внедрения в систему управления каждым агентом (квадрокоптером) компоненты синхронизации их движений. Решение учитывает требования данного метода к параметрам движения агентов до, во время и после образования формации. Приведены результаты численного моделирования с использованием линейной модели агента-квадрокоптера, показывающие работоспособность предложенной системы синхронизации движения сопряженных агентов.

Ключевые слова: групповое управление, формация, квазитепловое движение, синхронизация движения.

Роевая робототехника благодаря свойствам децентрализованности, масштабируемости и надежности имеет широкие перспективы применения в различных областях. Известны применения группы беспилотных летательных аппаратов в задачах экологического мониторинга [1,2], в том числе исследования в районе добычи полезных ископаемых [3]; предупреждение пожаров [4]; поисково-спасательных операциях [5,6]. В сельском хозяйстве роевые роботы могут использоваться для автоматизации процессов посева, ухода за растениями и сбора урожая.

Одной из важных задач, возникающей при управлении группой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является организация устойчивых формаций агентов системы. Известны различные подходы для управления роевой системой. Распространенным методом управления формированием является подход с лидером [7,8]. В этом случае члены группы следуют за БПЛА-лидером. При повреждении лидера может пострадать вся геометрическая структура (потеря устойчивости роевой формации). Поэтому в работе [9] был предложен метод виртуального лидера, однако такой подход требует больших вычислительных ресурсов. Подход, при котором создается искусственное потенциальное поле, решает проблемы предотвращения столкновений. Управляющие воздействия основаны на притягивающих и отталкивающих силах. Существует множество подходов, основанных на этом методе [11,12].

Общая проблема использования метода потенциального поля в реальных приложениях, обусловлено тем, что необходимо иметь полную информацию о пространстве, в котором функционирует рой.

Стратегия, основанная на консенсусе [13], не в полной мере учитывает динамику агентов. Целью консенсуса является приведение состояний всех членов группы к одному и тому же постоянному значению. В работах [13,14] продемонстрирована возможность управления формированием в условиях изменяющейся топологии связи.

Интеллектуальное управление обладает способностью к адаптации и обучению. Существуют методы, основанные на нечеткой логике [15] и нейронной сети [16].

Постановка задачи. Большинство методов группового управления, так или иначе, реализуют решение задачи формирования геометрических структур (формаций). Она сводится к поддержанию заранее заданного расстояния и направления до соседнего агента. Два агента, чье управление направлено на поддержание заданного расстояния между ними, будем называть сопряженными. В предыдущих работах [17-19] был предложен метод квазитеплового движения, текущая реализация которого в полной мере задачу формации не решает.

Особенностью сопряжения агентов, функционирующих по методу квазитеплового движения, является необходимость корректного перераспределения величин-эквивалентов кинетической и потенциальной энергии агента, принципиально важных для функционирования метода. Неправильное перераспределение этих величин приводит к наличию колебаний траектории движения агентов вокруг желаемого их относительного положения в формации. Наличие этих колебаний в данном случае, приводит к неэффективному расходованию энергии бортового источника питания агента.

Устранение относительных колебаний сопряженных агентов без изменения их среднеквадратичной скорости до и после взаимодействия позволит расширить функциональные возможности метода квазитеплового движения.

Математическая модель объекта управления. В данной работе объектом управления является агент – квадрокоптер. Движение объекта управления рассмотрено вдоль горизонтальной оси с использованием его упрощенной модели:

$$\begin{cases} \omega_{\mathrm{d}} = k_p\left(\varphi_{\mathrm{d}} - \varphi\right); \\ \dot{\omega} = k_d\left(\omega_{\mathrm{d}} - \omega\right); \\ \ddot{x} = \varphi * g, \end{cases} \tag{1}$$

где φ – угол отклонения квадрокоптера от вертикали (рад); φ_{d} – заданный угол отклонения квадрокоптера от вертикали (рад); $\ddot{x}$ – ускорение вдоль оси x (м/с2).

Линейная модель квадрокоптера получена при условиях:

1) нулевой скорости по рысканью;
2) динамика винтомоторных групп не учитывается ввиду их принципиально малой инерционности относительно инерционных свойств остальных элементов объекта управления;
3) угол отклонения квадрокоптера от вертикали мал, что позволяет опустить тригонометрические нелинейности кинематических соотношений.

Динамика вращательного и поступательного движения по горизонту описывается в пространстве состояний как:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + BU, \\ y &= Cx + DU, \end{aligned} \tag{2}$$

где

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -k_p k_d & -k_d \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_p k_d \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Модальный регулятор объекта управления обеспечивает стабилизацию среднеквадратичной скорости агентов до и после взаимодействия. Управление осуществляется с использованием фазовых координат агента и вектора коэффициентов усиления K:

$$U = Kx. \tag{4}$$

Коэффициенты обратных связей имеют вид:

$$K\left(p, g, k_p, k_d\right) = \begin{pmatrix} -\beta g^{-1}\left(p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_4 + p_1 p_3 p_4 + p_2 p_3 p_4\right) \\ \beta g^{-1} p_1 p_2 p_3 p_4 \\ \beta\left(p_2 p_3 + p_2 p_4 + p_3 p_4 + p_1\left(p_2 + p_3 + p_4\right)\right) \\ -\beta\left(k_d + p_1 + p_2 + p_3 + p_4\right) \end{pmatrix}, \tag{5}$$

$$\beta = \frac{1}{k_p k_d},$$

где p – корни характеристического уравнения разомкнутой системы, определяемые как:

$$p = \begin{pmatrix} -r_l - im_l * i \\ -r_l + im_l * i \\ -im_r * i \\ im_r * i \end{pmatrix}, \tag{6}$$

где r_l – действительная часть левой пары сопряженных корней характеристического уравнения; im_l – мнимая часть левой пары сопряженных корней; im_r – мнимая часть правых сопряженных корней.

Каждый агент имеет список соседних агентов $N_j = \{1..j\}$. Интенсивность взаимодействия с соседним агентом *j* является мерой пересечения сфер близкодействия, определяется как:

$$\begin{aligned} c_j &= d_j - \mathrm{sign}\left(d_j\right)\left(R + R_j\right), \\ d_j &= P_j^* - P^*, \\ P^* &= \begin{pmatrix} P & V & \varphi & \dot{\varphi} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} K \\ K_1 \end{pmatrix}, \end{aligned} \tag{7}$$

где R и R_j – радиусы взаимодействия сфер агентов; d – разница между координатами соседнего квадрокоптера j и собственными, скорректированными с учетом обратных связей модального регулятора; P – координата агента; V – скорость агента; φ – угол отклонения квадрокоптера от вертикали; $\dot{\varphi}$ – угловая скорость квадрокоптера.

Управление $U = C_{des}$ для сопряжения агентов вычисляется с помощью кусочно-линейной функции взаимодействия (рисунок 1):

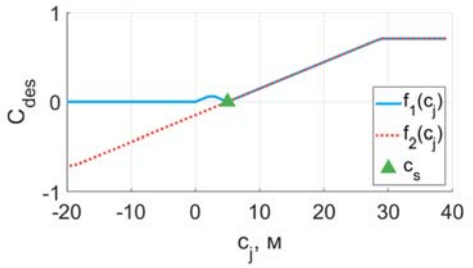


Рис. 1. Функция взаимодействия агентов, обеспечивающая их сопряжение

На рисунке 2 $f_1(c_j)$ – функция взаимодействия без сопряжения, $f_2(c_j)$ – функция взаимодействия во время сопряжения, c_s – точка переключения между $f_1(c_j)$ и $f_2(c_j)$, зависящая от заранее заданного расстояния между агентами и радиусами взаимодействия.

Уравнения функции взаимодействия имеют вид:

$$C_{des\ j} = \begin{cases} \max\left(\text{sign}(d_j)C_{\max}, f_1(c_j)\right), \textit{если } F_{en} = 0; \\ f_2(c_j) \textit{ в противном случае}, \end{cases}$$

$$f_1(c_j) = \begin{cases} 0, \textit{если} \quad |d_j| \geq R + R_j; \\ K_1 c_j, \textit{если} \quad 0.5(d_t + R + R_j) \leq |d_j| < R + R_j; \\ K_1\left(\text{sign}(d_j)d_t - d_j\right), \textit{если} \quad d_t \leq |d_j| < 0.5(d_t + R + R_j); \\ K_1\left(d_j - \text{sign}(d)d_t\right), \textit{если} \quad d_t > |d_j|, \end{cases} \quad (8)$$

$$f_2(c_j) = \max\left(\text{sign}(d_j)C_{\max}, K_1\left(d_j - \text{sign}(d_j)d_t\right)\right),$$

$$d_j = c_j + \text{sign}\left(P_j^* - P^*\right)\left(R + R_j\right),$$

где $C_{\max}$ – максимальное значение управления; d_t – заданное расстояние между агентами.

Синхронизация скоростей агентов. Классическим способом устранения колебаний является демпфирование. В случае квазитеплового движения использование демпфирования концептуально некорректно, так как тогда изменится среднеквадратичная скорость агентов до и после взаимодействия, что показано на рисунке 2.

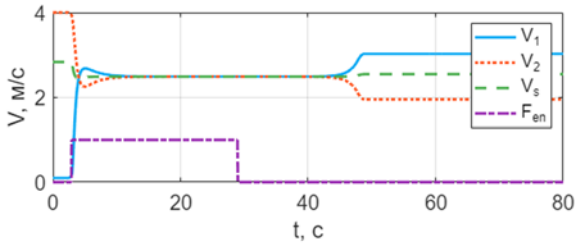


Рис. 2. Изменение среднеквадратичной скорости агентов до и после взаимодействия при использовании демпфирования

На рисунке 2 показано движение двух агентов со скоростями V_1 и V_2, а V_S – их среднеквадратичная скорость. В моменты времени $t = 0\,c$ и $t = 60\,c$ среднеквадратичная скорость V_S имеет разные значения, то есть значения V_S до и после взаимодействия агентов отличается. Следовательно, применение модального регулятора, обеспечивающего демпфирование агентов, друг относительно друга недопустимо.

Одним из вариантов устранения относительных колебаний агента с сохранение их среднеквадратичной скорости до и после взаимодействия является синхронизация движения агентов. Под синхронизацией движения агента с соседним понимается следующее:

$$\lim_{t\to\infty}\left|V - V_j\right| = 0,$$
$$\lim_{t\to\infty}\left|\varphi - \varphi_j\right| = 0, \quad (9)$$
$$\lim_{t\to\infty}\left|\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_j\right| = 0.$$

В случае рассмотрения тестовой системы «агент-границы» (рисунок 3) характер движения квадрокоптера является колебательным с постоянной амплитудой скорости при прохождении начала координат.

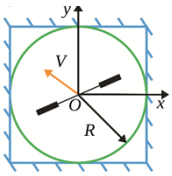


Рис. 3. Тестовая система «агент-границы»

На рисунке 3 схематично изображен квадрокоптер со сферой взаимодействия радиуса R. Квадрокоптер расположен между 4-мя границами допустимой области, удаленными от начала координат на расстояние R, и двигается со скоростью V.

В литературе [20] встречается решение задачи синхронизации сопряженных колебательных контуров. Но в этих работах контур является автоколебательным. В момент синхронизации амплитуда их скоростей падает, а после сопряжения восстанавливается. Тестовая система «агент-границы» не является автоколебательным контуром – предельных циклов у такой системы бесконечное множество, и они зависят от начальных условий. Система сопряженных агентов также не является автоколебательным контуром, поэтому использование напрямую метода синхронизации из проанализированной литературы не обеспечит равенство среднеквадратичной скорости агентов в момент сопряжения и в момент разъединения.

Сопряжение агентов рассматривается в рамках задачи создания агентами геометрических структур, что сводится к удержанию заданного расстояния и направления между агентами. Поэтому требуется, чтобы агенты синхронизировались на заданном расстоянии друг от друга d_t. Поэтому условия синхронизации (9) дополняются следующим уравнением:

$$\lim_{t\to\infty}\left|P - P_j\right| = d_t. \quad (10)$$

Реализованная функция взаимодействия с переходом в состояние сопряжения обеспечивает колебательные движения агентов на расстоянии d_t. Поэтому требуется определить дополнительное значение к управлению $C_{des\ j}$, обеспечивающее синхронизацию движения сопряженных агентов.

Для этого предлагается по аналогии с [20] для каждого агента управление корректировать на разницу между среднеквадратичной скоростью и собственной скоростью, деленное на количество сопрягаемых агентов:

$$C_{sync} = \frac{sign\left(V_{mean}\right)\sqrt{n_{sync}^{-1}\sum_k V_k^2} - V}{n_{sync}}, \quad (11)$$
$$V_{mean} = \frac{\sum_k V_k}{n_{sync}}, k = 1..n_{sync},$$

где n_{sync} – число синхронизирующихся агентов в состоянии сопряжения, когда $F_{en} = 1$ в (8); V – собственная скорость агента.

С учетом (11) $f_2\left(c_j\right)$ в (8) принимает вид:

$$f_2\left(c_j\right) = \max\left(\text{sign}(d)C_{\max}, C_{sync} + K_1\left(d_j - \text{sign}\left(d\right)d_t\right)\right), \quad (12)$$
$$d_j = c_j + \text{sign}\left(d_j\right)\left(R + R_j\right).$$

Моделирование. Для демонстрации работы синхронизации (12) выполнено численное моделирование двух агентов с линейной моделью, получаемой объединением (2),(3)(5),(6),(8),(12). Параметры модели агента указаны в табл. 1, а начальные условия в табл. 2.

При использовании функции взаимодействия (8) без компонента синхронизации (12) изменение скоростей двух агентов представлено на рисунке 4.

Изменение скоростей агентов с использованием компонента синхронизации приведено на рисунке 5.

На рисунке 4 V_1 и V_2 – скорости агентов, V_s – их среднеквадратичная скорость. При $t = 0\,c$ и $t = 60\,c$ среднеквадратичная скорость агентов V_s равна 2.83 м/с, то есть значения V_s до и после взаимодействия равны. При использовании демпфирования (рисунок 2) среднеквадратичная скорость взаимодействующих агентов в моменты времени $t = 0\,c$ и $t = 60\,c$ отличалась.

Таблица 1

Параметры моделирования

Параметр	Значение	Параметр	Значение
k_p	6.0	r_l	12.0
k_d	25.0	im_l	0.1
g	9.8	im_r	0.55
R, R_j	20.0	d_t	35

Таблица 2

Начальные условия

Параметр	Определение	Значение
P_1^0	Координата первого агента, м	50.0
P_2^0	Координата второго агента, м	0.0
V_1^0	Скорость первого агента, м/с	0.1
V_2^0	Скорость второго агента, м/с	4.0

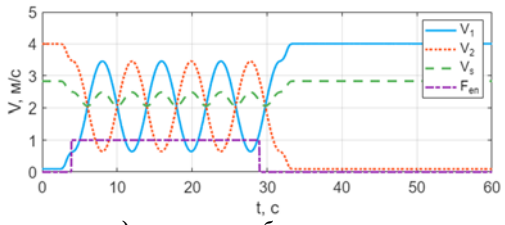


Рис. 4. Результат моделирования двух агентов без использования компонента синхронизации

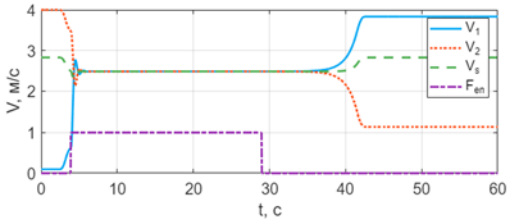


Рис. 5. Результат моделирования двух агентов с использованием компонента синхронизации

В момент взаимодействия среднеквадратичная скорость может изменяться, в том числе и для сопряженных агентов. В момент сопряжения часть кинетической энергии запасена в виде потенциальной – степени пересечения сфер взаимодействия, поэтому среднеквадратичная скорость синхронизированных агентов (например, при $t = 20\ c$) меньше, чем разъединенных (например, при $t = 60\ c$).

Ошибка позиционирования агентов относительно заданного расстояния d_t определяется как $\varepsilon_t = d_j - \text{sign}\left(d_j\right)d_t$ и представлена на рисунке 6.

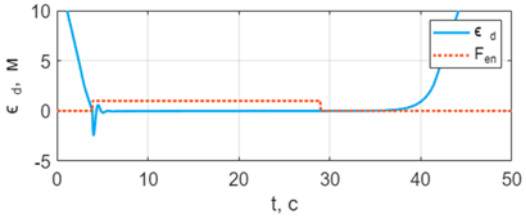


Рис. 6. Ошибка относительного расстояния двух агентов

В левой части рисунка 6 видно, что после начала сопряжения и синхронизации при достижении заданного относительного расстояния имеется незначительное перерегулирование, но затем ошибка позиционирования становится практически равной нулю, что и требуется обеспечить в задаче формирования геометрических структур (10).

В рамках работы проведено численное моделирование и при других начальных условиях по d_t, V_1^0 и V_2^0. При изменении движений агентов, также происходит их синхронизация на заданном расстоянии, а тенденции изменения среднеквадратичной скорости аналогичны тем, которые показаны на рисунке 5.

Результаты моделирования, представленные на рисунках 5 и 6 подтверждают корректность сопряжения и синхронизации агентов.

Заключение. В работе предложена система управления агентами роя, обеспечивающая синхронизацию их движения на заранее заданном относительном расстоянии. Предложенный подход исключает непроизводительные относительные колебания агентов и правильно перераспределяет их эквивалентные энергетические характеристики в дополнительное их сонаправленное поступательное движение (кинетическая составляющая), при заданном относительном положении (составляющая потенциальной энергии).

Стабилизация агентами заранее заданного относительного положения позволяет повысить энергетическую эффективность при организации формаций роем, обусловленную отсутствием относительных колебаний агентов.

Дальнейшая работа направлена на синхронизацию множества сопряженных агентов, а также исследование взаимодействия формаций агентов с границами допустимой области.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-10077, https://rscf.ru/project/23-29-10077/

Список литературы

1.Choi Y. Convex Hull Obstacle-Aware Pedestrian Tracking and Target Detection in Theme Park Applications / Y. Choi, H. Kim // Drones. 2023. Vol. 7. № 4. P. 279.

2.The Use of Unoccupied Aerial Systems (UASs) for Quantifying Shallow Coral Reef Restoration Success in Belize / E. A. Peterson, L. Carne, J. Balderamos [et al.] // Drones. 2023. Vol. 7. № 4. P. 221.

3.A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives / H. Ren, Y. Zhao, W. Xiao, Z. Hu // International Journal of Coal Science & Technology. 2019. Vol. 6. A review of UAV monitoring in mining areas. № 3. P. 320-333.

4.Multi-UAV Experiments: Application to Forest Fires / J. R. Martínez-de-Dios, L. Merino, A. Ollero [и др.] // Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles / ред. A. Ollero, I. Maza. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2007. С. 207-228.

5.Unsupervised Human Detection with an Embedded Vision System on a Fully Autonomous UAV for Search and Rescue Operations / E. Lygouras, N. Santavas, A. Taitzoglou [et al.] // Sensors. 2019. Vol. 19. № 16. P. 3542.

6.UAV Computing-Assisted Search and Rescue Mission Framework for Disaster and Harsh Environment Mitigation / S. H. Alsamhi, A. V. Shvetsov, S. Kumar [et al.] // Drones. 2022. Vol. 6. № 7. P. 154.

7.Chen F. Leader–Follower Formation Control With Prescribed Performance Guarantees / F. Chen, D. V. Dimarogonas // IEEE Transactions on Control of Network Systems. 2021. Т. 8. № 1. С. 450-461.

8.Wang Y. Motion Capability Analysis for Multiple Fixed-Wing UAV Formations with Speed and Heading Rate Constraints / Y. Wang, M. Shan, D. Wang // IEEE Transactions on Control of Network Systems. 2020. Т. 7. № 2. С. 977-989.

9.Zhang J. Multi-UAV Formation Control Based on a Novel Back-Stepping Approach / J. Zhang, J. Yan, P. Zhang // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Т. 69. № 3. С. 2437-2448.

10. Giulietti F. Formation flight control - A behavioral approach / F. Giulietti, M. Innocenti, L. Pollini. – Текст : электронный // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit : Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001. URL: https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2001-4239 (дата обращения: 01.10.2023).

11. Navigation information augmented artificial potential field algorithm for collision avoidance in UAV formation flight / H. Liu, H. H. T. Liu, C. Chi [et al.] // Aerospace Systems. 2020. Vol. 3. № 3. P. 229-241.

12. UAV formation control with obstacle avoidance using improved artificial potential fields / Y. Zhao, L. Jiao, R. Zhou, J. Zhang // 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). 2017. С. 6219-6224.

13. Ren W. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies / W. Ren, R. W. Beard // IEEE Transactions on Automatic Control. 2005. Т. 50. № 5. С. 655-661.

14. Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles with Directed and Switching Topologies / Y. Qi, S. Zhou, Y. Kang, S. Yan // International Journal of Aerospace Engineering. 2016. Т. 2016. С. 7657452.

15. Rezaee H. Model-free fuzzy leader-follower formation control of fixed wing UAVs / H. Rezaee, F. Abdollahi, M. B. Menhaj // 2013 13th Iranian Conference on Fuzzy Systems (IFSC) 2013 13th Iranian Conference on Fuzzy Systems (IFSC). 2013. С. 1-5. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6675677 (дата обращения: 01.10.2023).

16. Dierks T. Neural network control of quadrotor UAV formations / T. Dierks, S. Jagannathan. // 2009 American Control Conference 2009 American Control Conference. 2009. С. 2990-2996.

17. Гейс Э. А. Разработка метода организации движения группы БЛА на основе эквивалента теплового движения / Э. А. Гейс // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 11. С. 41-45.

18. Гейс Э. А. Разработка регулятора квадрокоптера, входным воздействием которого является эквивалент вектора силы потенциального поля / Э. А. Гейс // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 11. С. 10-15.

19. Heiss E. Assessing the similarity of atoms' thermal motion behavior by swarm agents / E. Heiss, O. Morozov, A. Efromeev // Proceedings of 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk : IEEE, 2022. P. 92-96.

20. Joshi S. K. Synchronization of coupled oscillators in presence of disturbance and heterogeneity // International Journal of Dynamics and Control. 2021. Vol. 9. № 2. P. 602-618.

Гейс Эдуард Альбертович, младший научный сотрудник, edheiss73@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Морозов Олег Олегович, канд. техн. наук, доцент, omo@sau.tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский Государственный университет,

Козырь Андрей Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Kozyr_A_V@mail.ru, Россия, Тула, Тульский Государственный университет

SYNCHRONIZATION OF AGENT MOVEMENTS FOR THE FORMATION OF GEOMETRIC STRUCTURES IN THE CASE OF THERMAL MOTION EQUIVALENT METHOD

E.A. Heiss, O.O. Morozov, A.V. Kozyr

In this paper we propose a solution to the problem of forming geometric structures (formation problem) for a swarm functioning by the method of quasi-thermal motion of agents. The problem is solved by introducing a component of synchronization of their movements into the control system of each agent (quadrocopter). The solution takes into account the requirements of this method to the motion parameters of the agents before, during and after formation. The results of numerical simulation using a linear model of a quadrocopter agent are given, showing the performance of the proposed system of synchronization of motion of coupled agents.

Key words: group control, formation, quasi-thermal motion, motion synchronization.

Heiss Eduard Albertovich, junior researcher, edheiss73@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Morozov Oleg Olegovich, candidtate of technical sciences, docent, omo@sau.tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kozyr Andrey Vladimirovich, candidtate of technical sciences, senior researcher, Kozyr_A_V@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-277-278

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ ПЛИС

И.А. Панков

В работе рассмотрена проблема поиска и анализа дефектов, обнаруживаемых в цифровых устройствах для программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Предложен подход к тестированию цифровых устройств на базе ПЛИС. Рассмотрена имитация дефектов для алгоритмов в ПЛИС на основе программных искажений. Разработан алгоритм обнаружения дефектов в цифровых устройствах на базе ПЛИС и представлены экспериментальные результаты.

Ключевые слова: цифровые устройства, тестирование ПО, ПЛИС, имитация неисправностей.

Введение. В настоящее время разработчики используют специализированные инструменты проектирования для ПЛИС, такие как среда проектирования Vivado фирмы *Xilinx*, Quartus Prime фирмы *Intel*. Чтобы оценить потребление ресурсов и производительность алгоритма на ПЛИС. При разработке цифровых алгоритмов особое значение имеет выбранная аппаратная платформа, которая задает структуру системы тестирования. В силу высокой степени интеграции и разнородности решаемых задач, проведение тестирования модулей обработки сигналов осуществляется с применением имитации неисправностей [1]. Существующие алгоритмы имитации неисправностей, применяемые для микроконтроллеров и микропроцессоров, не применимы для тестирования ПЛИС [2]. Решение задачи интеграции имитации неисправностей (в том числе с использованием программной техники фаззинга) к ПЛИС предполагает необходимость разработки алгоритма для проведения тестирования [3].

Постановка задачи. Целью тестирования является осуществление анализа дефектов для опытных образцов проектируемых цифровых устройств, содержащих в программируемую логику. Для тестирования алгоритмов цифрового устройства на базе ПЛИС необходимо адаптировать алгоритмы имитации неисправностей для выбранной аппаратной платформы [4]. Для этого разработана архитектура системы инъекции неисправностей и алгоритм проведения испытаний по внесению искажений в работающее устройство.

Структура стенда проведения испытаний. Стенд состоит из 3 ПЛИС внедрения неисправностей, исполняющегося алгоритма, верифицирующая) и АРМ оператора. Чтобы провести тестирование, предлагается стенд имитации неисправностей (рис. 1).

Для проведения экспериментального тестирования используются следующие типы вводимых ошибок *Ф1 – Ф4*:

$Ф_1$ - Зависание в ошибке (Stuck-at-faults) - позволяет моделировать большую часть отказов, возникающих в интегральной схеме, например, отказы в LUT (таблицами поиска); $Ф_2$ - Зависание в открытом состоянии (Stuck-open) - позволяет имитировать случайные межсоединения, путем случайного переключения соединения; $Ф_3$ - Задержка сигнала, позволяет моделировать неисправности, возникающие из-за нарушения синхронизации; $Ф_4$ - одиночное влияние частицы (single-event upset).

ПЛИС-1 выполняет функцию внесения неисправностей при различных сценариях имитации дефектов в режиме на основе списка соединений(netlist) и в режиме на основе анализа памяти (memory fault simulation).

На ПЛИС-2 загружен алгоритм цифровой обработки, над которым проводится эксперимент по внедрению неисправности. ПЛИС-3 фиксирует результаты выполнения алгоритма и отправляет эти данные на ПЭВМ. После чего в общем случае результаты выполнения алгоритма ПЛИС сопоставляются с результатами тестового модуля на ПЭВМ. Далее на основе полученных данных формируется статистика, которая позволит выявить расхождения от эталонной модели и сформировать метрики оценки текущей системы [5].

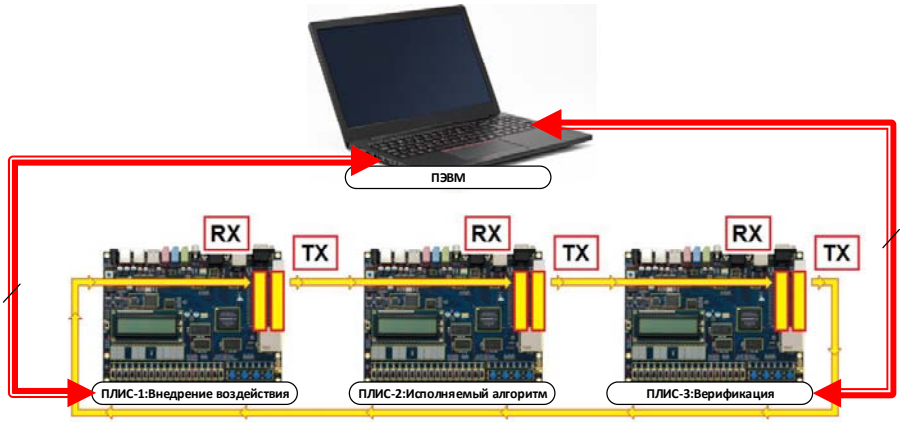


Рис. 1. Схема стенда для выявления дефектов

В режиме имитации неисправности на основе списка соединений вносятся на уровне логической схемы ПЛИС и исследуются возможные дефекты в логических структурах, соединениях и элементах. Для каждого указанного в программном интерфейсе приложения (API) типа соединения или элемента схемы генерируются неисправности, такие как короткое замыкание, обрыв, инверсия сигнала. Имитатор проверяет, как эти неисправности влияют на поведение системы в целом и какие ошибки могут возникнуть на выходе.

В режиме имитации на основе анализа памяти имитатор неисправностей выполняет анализ дефектов, связанных с блоками памяти в ПЛИС, такими как блоки RAM или FIFO буферы. Неисправности в памяти могут включать в себя битовые ошибки (E_1), ошибки адресации (E_2), задержки в доступе к данным и другие аномалии (E_3). Имитатор в этом режиме проверяет, как эти неисправности могут повлиять на чтение и запись данных в память и может проверять корректность чтения/записи.

Структурная схема программно-аппаратного обеспечения для внесения инъекций представлена на рисунке 2.

Логика внедрения неисправностей используется в виде параметризируемого HDL модуля. В архитектуре данного типа не применяются уникальные аппаратные решения, такие как BRAM, PLL и ЦП, что позволит реализовать данный HDL-дизайн на любом устройстве FPGA. Модуль введения неисправностей работает путем внедрения в исследуемый дизайн отдельных структур на основе заданного списка соединений в соответствии с предопределенной конфигурацией в оболочки API на ПЭВМ. Для каждой исследуемой структуры используется только один блок ввода ошибок, который может изменить соответствующий сигнал.

Основными блоками ввода ошибки (F_1-F_4) управляет блок ввода единичных неисправностей, который можно параметризировать в соответствии с текущей задачей. Блок ввода единичных неисправностей подключается к ПЭВМ по UART и позволяет менять конфигурации вводимых ошибок и контролировать работу системы. Модуль введения неисправностей загружается на ПЛИС-1 и содержит в себе логику инъектора неисправностей, причем воздействия вносятся на ПЛИС-2 с помощью внедряемых регистров в указанные части исполняемого алгоритма, этот процесс показан на рисунке 3.

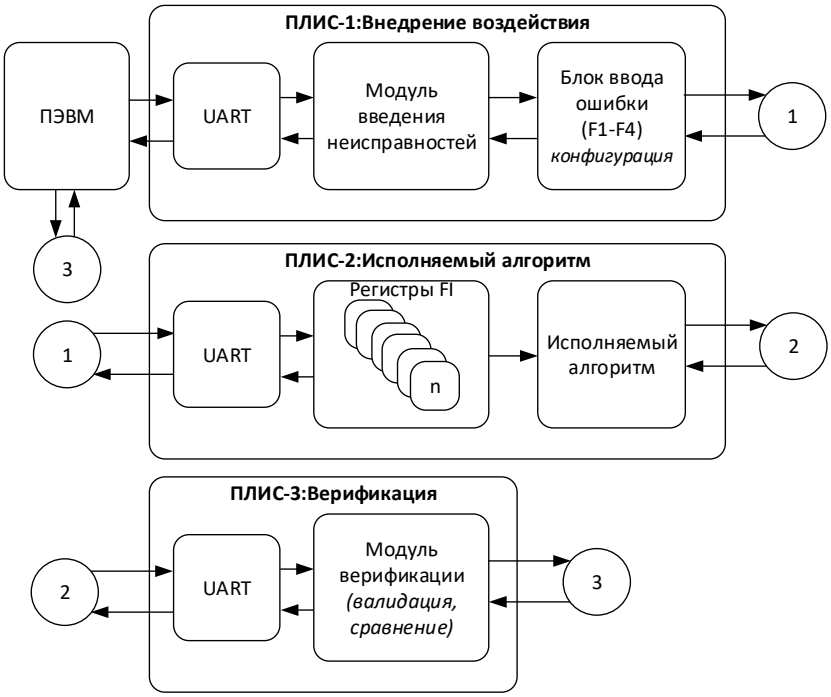


Рис. 2. Структурная схема программно-аппаратного обеспечения эксперимента

Описание алгоритма анализа дефектов ПЛИС. С целью определения места возникновения дефекта предлагается алгоритм на основе внедрения неисправностей который представлен на рисунке 2.

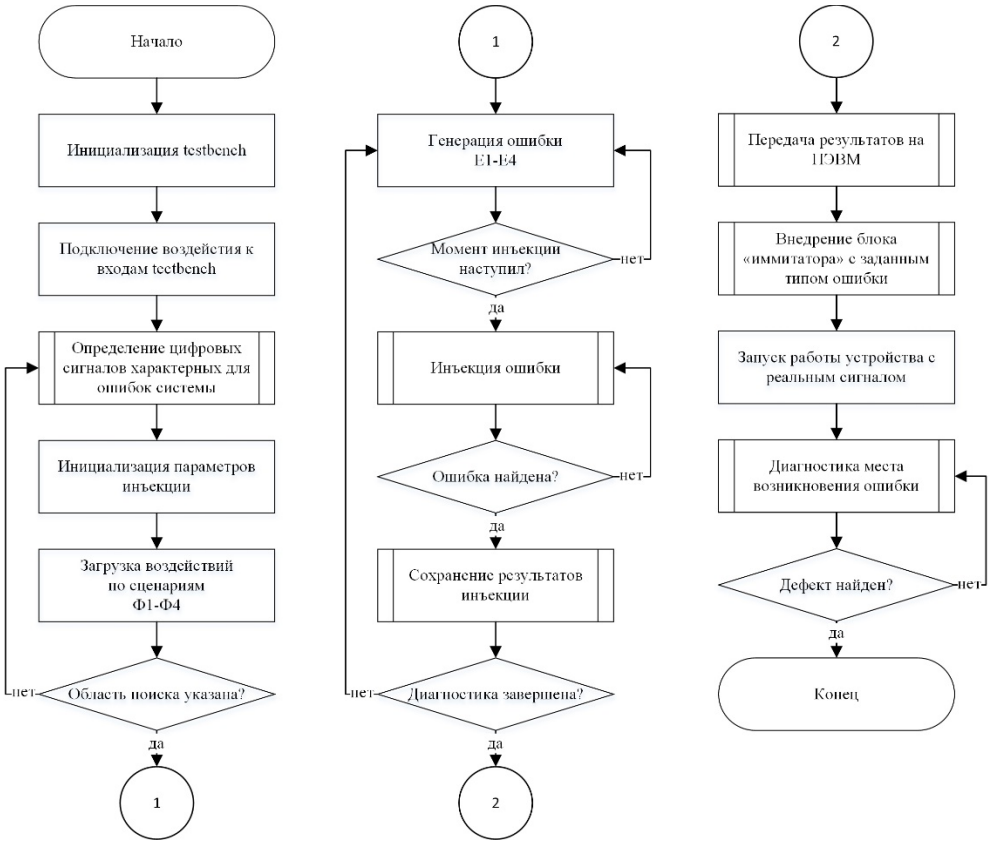


Рис. 2. Алгоритм работы инъекции неисправности

Алгоритм, предложенный для определения места возникновения дефекта, представляет собой структурированный подход, основанный на внедрении неисправностей. Процесс исследования и диагностики начинается с выполнения следующих этапов:

Этап 1. Инициализация *testbench*: настройка и инициализация тестовой среды, предоставляющей инструментарий для проверки функциональности и устойчивости цифрового дизайна в условиях возможных ошибок. Производится подключение элемента фаззинга (искажения входных данных блока) [3,6] к входам *testbench*: в данном этапе возможно подключение блока фаззинга, предназначенного для генерации различных тестовых сценариев и данных, используемых при проведении тестирования.

Этап 2. Определение цифровых сигналов, характерных для ошибок системы: выделение сигналов, которые могут служить индикаторами наличия или отсутствия дефектов в системе. Инициализация параметров инъекции: установка параметров, определяющих характеристики инъекции ошибок, таких как тип ошибок, места инъекции, частота инъекции и другие.

Этап 3. Загрузка воздействий по сценариям $Ф_1$-$Ф_4$: загрузка сценариев воздействий ($Ф_1$-$Ф_4$), определяющих типы и места возможных ошибок. Эти сценарии могут быть предопределены или формироваться динамически в соответствии с требованиями тестирования.

Этап 4. Генерация ошибки E_1-E_4: подготовка к генерации ошибок, включая проверку возможности возникновения ошибок в указанной области поиска. Производится проверка наступления момента времени для внедрения ошибки. Инъекция ошибки: при наступлении момента инъекции фактически происходит внедрение ошибки. Включает в себя изменение состояния цифровых сигналов, модификацию значений регистров и другие манипуляции с аппаратурой.

Этап 5. Проверяется, была ли обнаружена ошибка в результате инъекции. Сохранение результатов инъекции: Производится сохранение данных о месте и способе внедрения ошибки для последующего анализа. Проводится проверка завершения процесса диагностики. Результаты инъекции и диагностики передаются на персональный компьютер (ПЭВМ) для дальнейшего анализа.

Этап 6. Внедрение блока "имитатора" с заданным типом ошибки: производится загрузка блока, эмулирующего конкретный тип ошибки. Запуск работы устройства с реальным сигналом: устройство запускается с внедренным блоком и имитатором ошибки. Диагностика места возникновения ошибки: Осуществляется анализ результатов для определения места возникновения ошибки. Проверяется, был ли обнаружен дефект в системе.

Этот алгоритм представляет собой циклический процесс тестирования и диагностики, который может быть использован для поиска и изоляции неисправностей в цифровом дизайне на FPGA. Важным аспектом является генерация разнообразных тестовых сценариев и механизм инъекции ошибок для проверки стойкости системы к различным аппаратным сбоям.

В результате тестирования были введены и обнаружены следующие виды ошибок, которые представлены в таблице.

Результаты испытаний

	Тип внесения ошибки	Место внесения ошибки	Процент обнаружений при числе повторений n ≤100	Процент обнаружений при числе повторений n ≥100
1	Ф1	A_1	40	70
		A_2	45	20
		A_3	60	10
2	Ф2	B_1	15	50
		B_2	61	25
		B_3	44	32
3	Ф3	C_1	26	43
		C_2	64	54
		C_3	83	65
4	Ф4	D_1	11	56
		D_2	25	67
		D_3	41	69

Ф1 - Зависание в ошибке (Stuck-at-faults): A1 - отказ в LUT; A2 - отказ в регистре; A3 - отказ в мультиплексоре в схеме маршрутизации; **Ф2** - Зависание в открытом состоянии (Stuck-open) B_1 Открытая линия передачи данных; B_2 - Отказ в коммутационном блоке маршрутизации; B_3 Отказ в блоке мультиплексирования на входе в блок памяти. **Ф3** - Задержка сигнала (Delay): C_1 - задержка в блоке сравнения; C_2 - задержка в блоке управления; C_3 - задержка в линии передачи тактовых импульсов. **Ф4** - Одиночное влияние частицы (Single-event upset): D_1 - изменение значения регистра; D_2 - изменение состояния выхода порта; D_3 - изменение значения входа ЦОС.

Заключение. Поиск дефектов цифровых устройств на базе ПЛИС является сложной задачей, поэтому для тестирования и поиска ошибок проектирования применяется алгоритм введения неисправностей, основанный на программных инъекциях группы типов основных дефектов и анализа их проявления при испытании на разработанном СПО. Экспериментальные результаты показывают, что совмещение алгоритмов имитации с алгоритмами эмуляции (*testbench*) с модулями анализа на ПЭВМ позволяют выявить ошибки проектирования (до 70% вносимых ошибок). В дальнейшем планируются доработать полученный алгоритм для поиска ошибок в схемах с большим числом соединений и повышение скорости обнаружения ошибок за счет алгоритмов машинного обучения.

Список литературы

1. Christian Fibich, Stefan Tauner, Peter Rössler, Martin Horauer, Martin Matschnig, Herbert Taucher. FIJI: Fault InJection Instrumenter. 2023. [Электронный ресурс] URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s13639-019-0088-7.pdf (дата обращения 10.05.2023).

2. Чекмарев С.А. Метод инъектирования сбоев для тестирования сбоеустойчивых микропроцессоров типа система на кристалле 05.13.05. Красноярск, 2015. 135 с.

3. Timoty Trippel, Kang G. Shin [el al]. Fuzzing Hardware Like Software. 2022. [Электронный ресурс] URL: https://www.usenix.org/system /files/sec22- trippel.pdf (дата обращения 10.05.2023).

4. Русаков М.А. Многоэтапный анализ архитектурной надежности в сложных информационно-управляющих системах: дис. канд. техн. наук. Красноярск, 2005. 168 с.

5. Tasiran S., Keutzer K. Coverage metrics for functional validation of hardware designs // IEEE Design & Test of Computers. 2001. P. 36-45. DOI: 10.1109/54.936247.

6. Ковалев И.В. Анализ проблем в области исследования надежности программного обеспечения: многоэтапность и архитектурный аспект // Вестник СибГАУ. 2014. № 4. С. 78–92.

Панков Илья Анатольевич, аспирант, pankov99ai@yandex.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

DETECTING DEFECTS WHEN TESTING ALGORITHMS DIGITAL DEVICES BASED ON FPGA

I.A. Pankov

The paper examines the problem of searching and analyzing defects found in digital devices for programmable logic integrated circuits (FPGAs). An approach to testing FPGA-based digital devices is proposed. The simulation of defects for algorithms in FPGAs based on software distortions is considered. An algorithm for detecting defects in FPGA-based digital devices is developed and experimental results are presented.

Key words: digital devices, software testing, FPGA, fault simulation.

Pankov Ilya Anatolyevich, postgraduate, pankov99ai@yandex.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 621.396
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-281-282

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИТУАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

Н.П. Удальцов, П.А. Агеев, Е.В. Михейкина

В статье рассматриваются особенности построения ситуационных тренажеров на основе моделирования деятельности должностных лиц органов управления с целью совершенствования способов и методов работы и повышения качества управления.

Ключевые слова: должностное лицо, орган управления, организация, ситуационное моделирование, обстановка, сценарий, специальное программное обеспечение.

Тренажер – это учебно-тренировочное устройство для отработки рабочих навыков, выработки и совершенствования техники управления машиной (механизмом) [1].

В государственных стандартах определение тренажера включено в класс «Системы человек-машина». ГОСТ 21753-76 под тренажером определяет «техническое средство, предназначенное для профессиональной подготовки операторов системы «человек-машина», отвечающее требованиям методики подготовки, реализующее модель системы «человек-машина» и обеспечивающее контроль качества деятельности обучаемого» [2].

Особый класс представляют компьютерные тренажеры. Под компьютерным тренажером (КТ) понимается тренажер, обеспечивающий генерацию модели реальности в соответствии с математической моделью этой реальности при помощи программных средств. При использовании КТ осуществляется подача на основные органы восприятия обучаемого (зрительные, слуховые, тактильные, обонятельные) программно-управляемых воздействий, а также обеспечивается реалистичная реакция моделируемой среды на производимые действия, в результате чего появляется эффект личного участия пользователя в наблюдаемой виртуальной среде. Задача КТ – обеспечить соответствие усваиваемых материалов или навыков требованиям предстоящей работы, повысить эффективность учебного процесса, а также добиться того, чтобы усвоенные при обучении стереотипы поведения были успешно перенесены на условия реальной деятельности в качестве должностного лица органа управления.

Используемая в педагогике классификация средств обучения относит КТ к категории технических средств обучения, т .е. системам, комплексам, устройствам и аппаратуре, применяемым для предъявления и обработки информации в процессе обучения с целью повышения его эффективности [3].

По функциональному назначению технические средства обучения (ТСО) обычно разделяют на три основных класса: информационные, контролирующие и обучающие [4].

К информационным относятся средства, отличительной особенностью которых является преобразование информации, записанной на том или ином носителе, в удобную для восприятия форму.

Контролирующие ТСО могут быть индивидуальными и групповыми. Они отличаются типом обучающих программ и методом ввода ответа обучаемых. По степени сложности ТСО контроля знаний варьируются от простых карт, таблиц и билетов автоматизированного контроля до специальных компьютерных программ. При этом в интересах повышения качества обучения необходимо предусматривать специальные программные средства анализа результатов работы обучаемых с подробным разъяснением допущенных ошибок и показом правильных действий.

Технические средства обучения обеспечивают предъявление учебной информации обучаемым по определенным программам, заложенным в технические устройства, и, при необходимости, одновременный контроль правильности их практических действий и контроль усвоения теоретических знаний.

Кроме того, существуют технические средства обучения, совмещающие функции различного назначения – комбинированные.

Важнейшей отличительной чертой КТ является тип модели виртуальной реальности, предлагаемой обучаемому. Выделяют следующие типы модели виртуальной реальности – на основе статической модели и на основе динамической модели [5].

Тренажеры, построенные на основе статической модели, обучают действиям с некоторыми статичными объектами при отсутствии внешних возмущений. В таких тренажерах нет ситуаций, развивающихся во времени. На основе статической модели строятся технические тренажеры, представляющие собой виртуальные стенды для отработки методик действий с приборами и оборудованием.

Тренажеры на основе динамической модели предназначены для обучения действиям с объектами при наличии внешних возмущений. Ситуации, возникающие в ходе работы, могут развиваться во времени. На основе динамической модели строятся тренажеры-симуляторы (например, управление самолетом и т. п.), а также технические тренажеры для отработки действий в нештатных ситуациях. Внешние возмущения для тренажера задаются преподавателем при составлении задания или прямо во время работы обучаемого на тренажере, а также могут являться факторами, заложенными в сценарии обучения.

Анализ современных программных тренажеров показывает, что общими функциями, поддерживаемыми всеми тренажерными комплексами, являются функции имитации объектов реальной действительности и интерактивного взаимодействия с пользователем [6].

При подготовке должностных лиц (ДЛ) органов управления необходимо обеспечить функцию информационной поддержки обучаемых. Можно выделить два способа управления информационной поддержкой – интерактивное и контекстное. Интерактивное управление подразумевает отображение информации по требованию пользователя и с учетом ситуации, в которой он находится. При контекстном управлении информация отображается не по инициативе пользователя, а в зависимости от текущей ситуации (например, если обучаемый допустил ошибку). Предлагается использовать оба подхода.

Важнейшей необходимой функцией КТ является функция контроля действий обучаемого. Различают входной, профильный (функциональный) и выходной контроль. Входной контроль, как правило, представляет собой набор тестов с вопросами по основным положениям, понятиям и концепциям теории. Профильный (функциональный) контроль заключается в постоянном мониторинге действий обучаемого на предмет адекватности его действий

моделируемой ситуации. Выходной контроль заключается в проверке и оценке пользовательских решений по заданным этапам моделируемой ситуации; данную проверку целесообразно осуществлять автоматически. При этом важнейшей функцией является функция КТ по автоматическому анализу действий обучаемого с последующим документированным разбором допущенных ошибок и указаниями как нужно было действовать в интересах принятия правильных решений.

С учетом специфики деятельности ДЛ органов управления необходимо учитывать следующее – при их обучении с использованием КТ реальная деятельность на тренажере должна не “имитироваться” (имитация – от лат. *imitacio* – подражание), а “моделироваться”; моделирование, в свою очередь, предполагает и некоторое упрощение реальной деятельности (когда в ней выделяется лишь самое существенное). Это предполагает переход от классических КТ к их разновидности – ситуационным тренажерам, построенным на основе подходов ситуационного моделирования и решении обучаемыми ситуационных задач, представленных в виде сценариев различных реальных ситуаций [7-9].

Ситуационные задачи позволяют организовать процесс обучения таким образом, что он будет актуализировать уже имеющиеся у обучаемых знания и навыки в различных видах деятельности, связанных с реальной практической профессиональной проблемой, в игровой форме. Ситуационные задачи на сегодняшний день рассматриваются как средство обучения, стимулирующее развитие творческого потенциала обучаемых, их коммуникативные способности, навыки реализации знаний в практико-ориентированной деятельности.

Ситуационные тренажеры предназначены для формирования в пошаговом режиме устойчивых навыков деятельности в конкретных ситуациях. Они могут использоваться также для контроля и оценки уровня навыков работы в различных ситуациях как в автономном режиме функционирования, так и в связке с другими имитационными тренажерами (в виде набора вводных, потока событий в виде распоряжений, докладов и сообщений), возникающих внезапно в процессе имитации функционирования органа управления).

На рис. 1 показан базовый вариант ситуационного тренажера.

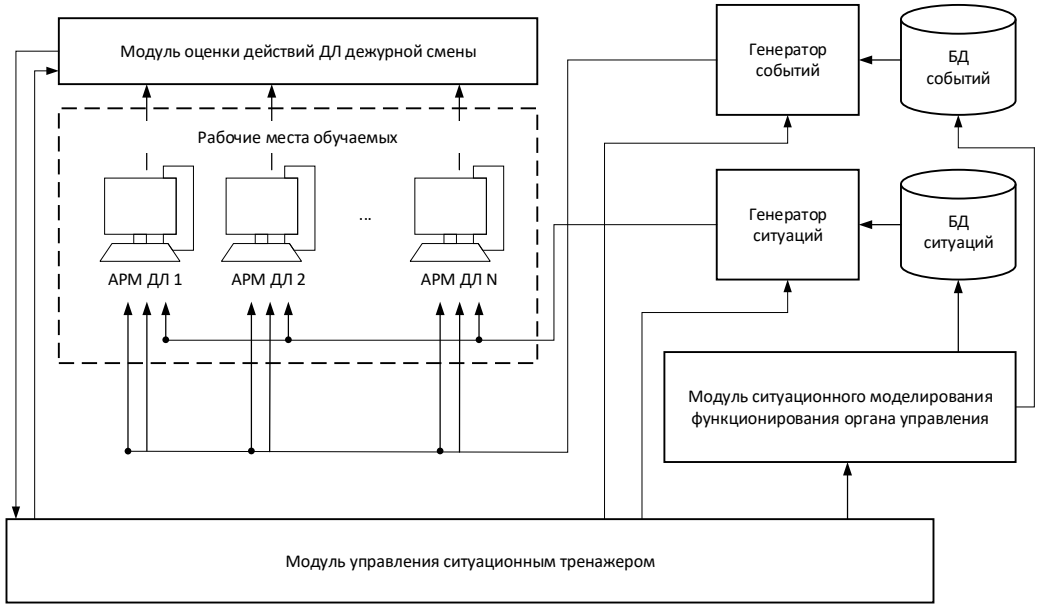


Рис. 1. Базовый вариант ситуационного тренажера

Таким образом, основу ситуационных тренажеров составляет ситуационное моделирование – обобщенное описание функционирования органа управления с помощью ситуаций, которые требуют управленческих реакций.

Ситуационный подход к управлению объектами характеризуется рядом признаков. Рассматривается конечное множество ситуаций, возникновение которых учитывается на этапе создания тренажера. С каждой ситуацией, выделенной на этом этапе, связываются определенные управленческие решения ДЛ в виде управляющих воздействий.

Ситуации могут быть связаны друг с другом различными отношениями: перехода, иерархии, многомерности развития. Отношениям соответствуют некоторые предикаты (например, предикаты перехода в зависимости от текущих значений измеряемых параметров задают условия перехода из одной ситуации в другую). Выявление отношений между ситуациями и построение соответствующих предикатов производится на этапе моделирования. Множество ситуаций и отношений между ними составляет ситуационную модель. Ситуационное управление требует больших затрат на создание предварительной базы сведений об объекте управления, его функционировании и способах управления им. Часто для принятия решения необходимо учитывать качественные знания, сложно формализуемые в обычном математическом смысле. Ситуационное моделирование представляет собой подход к моделированию, основанный на обнаружении ситуаций из заранее определенного множества и принятии управленческих решений, ассоциированных с ситуациями [10].

Состав ситуационного тренажера:

автоматизированные рабочие места обучаемых (АРМ ДЛ);

модуль ситуационного моделирования функционирования органа управления;

база данных и генератор ситуаций;

база данных и генератор событий;

модуль оценки действий должностных лиц дежурной смены;

модуль управления ситуационным тренажером.

Ситуационный тренажер предлагается строить по модульному принципу. Модули и связанные с ними элементы представляют из себя обособленные функционально полноценные элементы специального программного обеспечения (СПО). Автоматизированные рабочие места обучаемых (ДЛ) могут поставляться как элемент ситуационного тренажера с соответствующим СПО или могут использоваться в составе штатных АРМ ДЛ органа управления с добавлением в них режима «Тренажер».

Список литературы

1. Большая советская энциклопедия. [Электронный ресурс] URL: https://bse.slovaronline.com (дата обращения: 10.04.2023).

2. ГОСТ 21753-76. Система человек-машина. Рычаги управления. Общие эргономические требования. М, 1976.

3. Средства обучения: понятие, функции и классификация. [Электронный ресурс] URL: https://zaochnik-com.com/spravochnik/pedagogika/teorija-obuchenija/sredstva-obuchenija (дата обращения: 10.04.2023).

4. Что такое виртуальная реальность: свойства, классификация, оборудование – подробный обзор области. [Электронный ресурс] URL: https://tproger.ru/translations/vr-explained. (дата обращения: 10.04.2023).

5. Что такое виртуальная реальность: свойства, классификация, оборудование – подробный обзор области. [Электронный ресурс] URL: https://tproger.ru/translations/vr-explained (дата обращения: 10.04.2023).

6. Статические и динамические модели идеального тренажера. [Электронный ресурс] URL: https://studfile.net/preview/1672879/page:6 (дата обращения: 10.04.2023).

7. Удальцов Н. П., Агеев П. А., Кудрявцев А. М. Алгоритм ситуационного моделирования деятельности должностных лиц органов управления. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 218-224.

8. Способ профессиональной подготовки должностных лиц органов управления радиомониторинга (Пат. РФ № 2776323, МПК G09B9/00, опубл. 18.07.2022, бюл. № 20).

9. Способ профессиональной подготовки должностных лиц органов управления радиомониторинга (Пат. РФ № 2777121, МПК G09B9/00, опубл. 01.08.2022, бюл. № 22).

10. Юсупова Н. И., Сметанина О. Н., Еникеева К. Р. Иерархические ситуационные модели для СППР в сложных системах // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. [Электронный ресурс] URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=9814 (дата обращения: 10.04.2023).

Удальцов Николай Петрович, канд. воен. наук, профессор, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Агеев Павел Александрович, канд. воен. наук, доцент, pol18deligne@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Михейкина Елена Викторовна, канд. техн. наук, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного

CONSTRUCTION FEATURES SITUATIONAL SIMULATORS

N. P. Udalzov, P. A. Ageev, E. V. Miheykina

The Article discusses the features of building situational simulators based on modeling the activities of government officials in order to improve the methods and methods of work and improve the quality of management.

Key words: official, management body, organization, situational modeling, situation, scenario, special software.

Udalzov Nikoly Petrovich, candidate of military sciences, professor, Russia, Sankt-Petersburg, Military Academy of Telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny,

Ageev Pavel Aleksandrovich, candidate of military sciences, docent, pol18deligne@rambler.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Military Academy of Telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny,

Miheykina Elena Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, Russia, Sankt-Petersburg, Military Academy of Telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny

УДК 004.4
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-284-285

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ В ОЦЕНКЕ СВЕЖЕСТИ ПАСТЕРИЗОВАННОГО МОЛОКА

О.Б. Воскобойникова, А.В. Суханов, Т.Е. Мамонова, О.А. Ганина

В работе предложен способ определения кислотности молока с использованием цветометрического анализа изображения цветовой шкалы. Данный способ позволяет произвести оценку кислотности пастеризованного молока на основании измерения цветометрических характеристик индикатора свежести как визуально, так и с использованием цветорегистрирующих устройств. Показано, возможность применения технологий компьютерного зрения для определения цветометрических параметров индикатора свежести с целью объективного и достоверного определения качество пищевых продуктов.

Ключевые слова: индикатор свежести молока, технология компьютерного зрения, NI Vision Builder for Automated Inspection.

Свежести продуктов питания потребитель может оценить только по дате изготовления и сроку годности, указанному на упаковке без нарушения целостности упаковки. Зачастую продукт может испортиться на протяжение заявленного срока годности, например, из-за неправильных условий хранения и транспортировки. Такая продукция может навредить не только здоровью, но и безопасности потребителя.

Качество молока, как потребительского продукта, определяется органолептическими показателями – внешний вид, консистенция, вкус и запах, цвет, и физико-химическими показателями, такими как термоустойчивость, кислотность и другие. Одним из ключевых физико-химических показателей является кислотность. Свойство молока, которое оказывает наибольшее влияние на способность молока к фертильной коагуляции [1].

Существует большое количество работ, направленных на определение свежести пищевых продуктов, которые основываются на изменение цветометрических параметров индикаторов свежести. Интеллектуальная упаковка на основе индикаторов свежести обеспечивает индикацию порчи или потери свежести упакованных продуктов [2]; индикаторы свежести, основанные на изменении цвета, наиболее привлекательны из-за возможности показать уровень свежести купленных продуктов без каких-либо инструментов. Известны примеры разработки индикаторов свежести для рыбы [3, 4], мяса [5] и молока [6]. Индикатор свежести отражает параметры анализируемого объекта путем изменения своих цветовых характеристик, которые определяются визуально, что не лишено субъективной составляющей. Контроль за изменением цветометрических параметров осуществляется с использованием лабораторного колориметра, который недоступен широкому кругу потребителей. Наличие системы контроля за цветометрическими параметрами позволит более объективно и достоверно определять качество пищевых продуктов.

Контрастность изменения цвета дает достоверную информацию о свежести купленных продуктов. Для уменьшение субъективной составляющей и для автоматизации оценки свежести пищевых продуктов нами предложена технология на основе компьютерного зрения и алгоритма обработки цветометрических параметров индикатора свежести. Предложенная технология была использована для определения свежести пастеризованного молока.

В данной работе при создании индикатора свежести пастеризованного молока, использован колориметрический сенсор, на основе кислотно-основного индикатора 2,6-дихлорфенолдифенола (ДХФ), иммобилизованного в полиметакрилатную матрицу (ПММ). Оценка качества пастеризованного молока производится на основание изменения цвета индикатора. Система компьютерного зрения реализована с использованием веб-камеры и персонального компьютера. Для извлечения количественной информации об изменении цвета индикатора свежести был применен алгоритм обработки изображения, реализованный в Vision Builder for automated inspection National instruments.

Исследование изменения кислотности молока при хранении. Экспериментальная зависимость pH молока от времени хранения, комнатной температуре представлена на рисунке 1. Начальный период хранения (менее 12 часов) pH молока составляет диапазон от 6,78 до 6,48 и соответствует неиспорченному молоку. В период с 12 часов до 20 часов наблюдается резкое снижение pH до 4.5. Это соответствует периоду прокисания молока. В период более 20 часов хранения pH молока остается равным 4.5, что соответствует окончательно испорченному продукту.

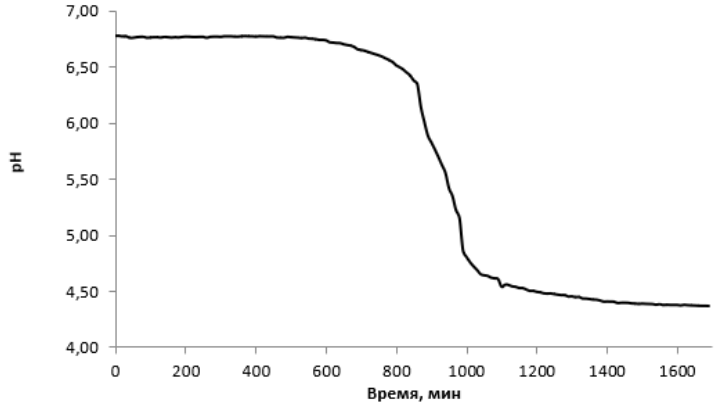


Рис. 1. Зависимость pH молока от времени хранения при комнатной температуре

Согласно данным, взятым в [9], при pH молока 6,5 и менее продукт считается испорченным. Таким образом, данное значение может использоваться в качестве показателя испорченного продукта.

В качестве индикатора свежести пастеризованного молока использовали индикатор свежести на основе ДХФ, иммобилизованного в ПММ. Полиметакрилатная матрица представляет собой специально созданный матери-

ал, содержащий функциональные группы, позволяющий извлекать вещества для последующего анализа. Синтез ПММ проводили согласно [7]. Иммобилизацию ДХФ в ПММ осуществляли путем сорбции его из 0,01 % водного раствора в статических условиях в течение 2 мин.

Кислотно-основные и окислительно-восстановительные свойства ДХФ в ПММ подробно рассмотрены в [8]. На рис. 2 представлены спектры поглощения колориметрического сенсора, после контакта с растворами при различном значении pH.

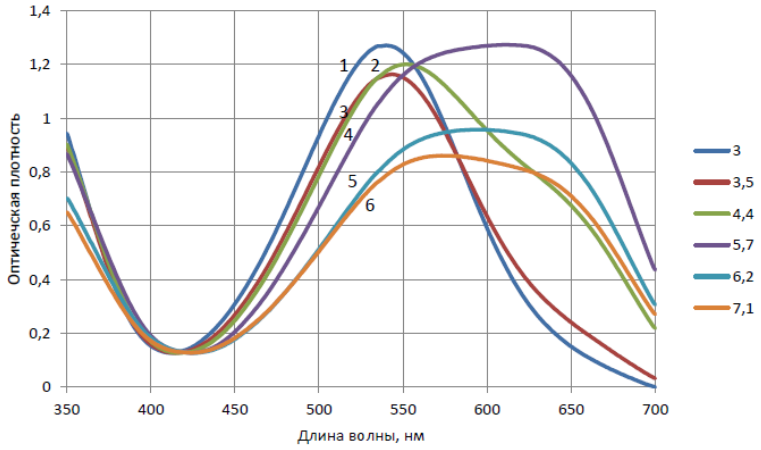


Рис. 2. Спектры поглощения ДХФ иммобилизованного в ПММ, после контакта с растворами с разным значением pH: 1 – pH = 3,0; 2 – pH = 3,5; 3 – pH = 4,4; 4 – pH = 5,7; 5 – pH = 6,2; 6 – pH = 7,1

Видно, что изменение pH раствора сопровождается изменением поглощения при 550 нм и 610 нм. Визуально, при этом, наблюдается изменение цвета цветометрических параметров от сине-фиолетового до светло-фиолетового.

Таким образом данный цветометрических параметров может быть использован для контроля изменения pH молока при его хранении.

Система компьютерного зрения. Для оцифровки изображений индикатора свежести использовалась веб-камера подключенная к персональному компьютеры с установленным программным обеспечением National Instruments Vision Builder for Automated Inspection 2015 f3. Установленное программное обеспечение позволяет регистрировать цветометрические координаты в режиме реального времени. Поскольку процесс скисания молока длителен во времени, в ходе экспериментов цветометрические координаты индикатора свежести снимались раз в 10 минут в течение 59 часов, при постоянных условиях освещения.

Процесс обработки изображения включал цикл, состоящий из этапа выбора зоны считывания цветометрических параметров и этапа считывания цветометрических параметров и последующий расчет цветовой разницы по уравнению (1):

$$\Delta E_i = ((R_0\text{-}R_i)^2 + (G_0\text{-}G_i)^2 + (B_0\text{-}B_i)^2)^{1/2}, \quad (1)$$

где R_0, G_0 и B_0 – координата цветности показателя свежести молока в системе RGB на неиспорченном молоке; R_i, G_i и B_i – координаты цветности показателя свежести молока в системе RGB на текущий момент времени. Далее выполнялось сравнение с критическим значением (ΔEcv), которое характеризует предельное значение pH молока, при котором молоко считается испорченным.

Процесс определения свежести молочной продукции представлена в виде схемы на рис. 3. На рис.4. представлен алгоритм обработки полученного изображения.

Как показано на рис. 3, индикатор свежести имеет сине-фиолетовый цвет в начальном неиспорченном продукте. Ухудшение качества молока сопровождается снижением pH, а индикатор свежести приобретает фиолетовую окраску. Кроме того, индикатор свежести обесцвечивается из-за усиления окислительно-восстановительной активности компонентов молока в кислых средах (рис. 5).

Предварительные опыты позволили определить предельное значение цветовой разницы, указывающее на испорченное молоко. В условиях проведенных экспериментов это значение составило ΔEcv = 60 и было принято за критическое значение.

Алгоритм обработки изображений реализован с помощью NI Vision Builder for Automated Inspection. Скриншоты реализованного алгоритма контроля свежести пастеризованного молока представлены на рис. 6.

Изменение кислотности молока сопровождается соответствующим изменением каждой координаты. На рис. 7 показаны спектры поглощения матриц. Легенда графика показывает срок хранения молока (ч), по истечении которого были получены спектры матриц.

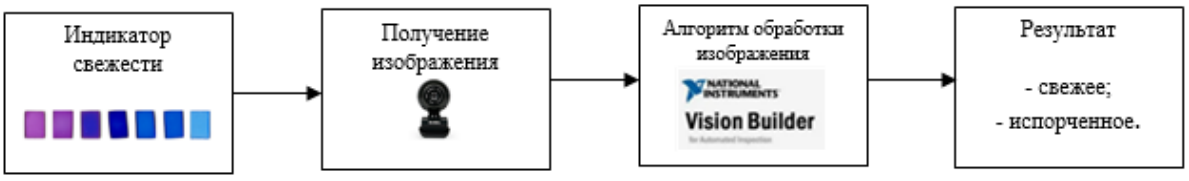


Рис. 3. Процесс определения свежести молока

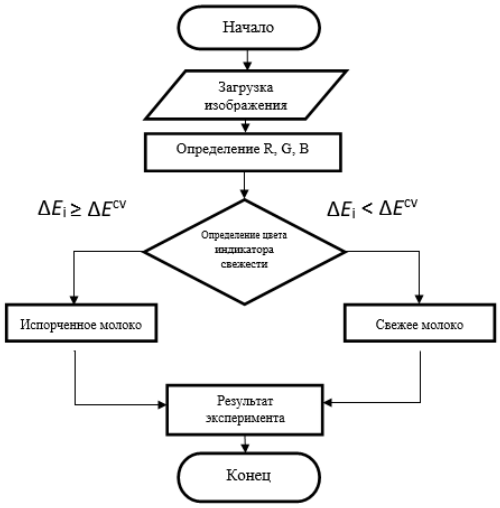
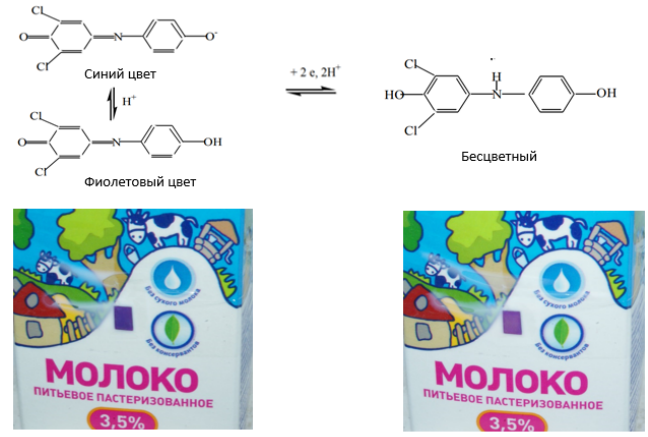


Рис. 4. Алгоритм обработки изображения



a) Свежее молоко b) Испорченное молоко

Рис. 5. «Механизм» определения свежести молока

Рис. 6. Скриншоты реализованного алгоритма контроля свежести пастеризованного молока

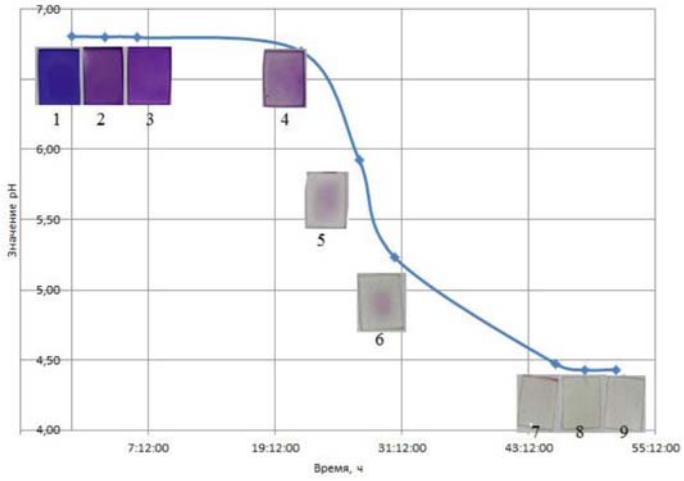


Рис. 7. ПММ в течение срока хранения молока

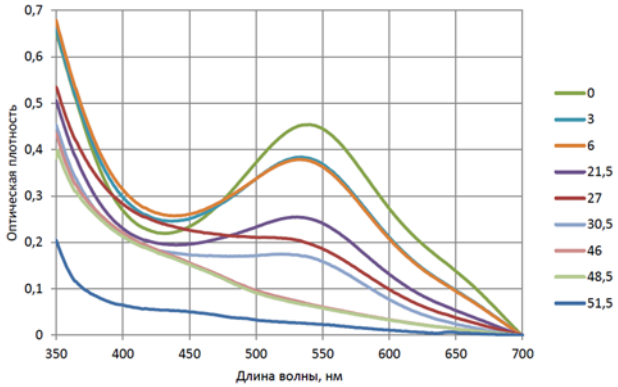


Рис. 8. Спектры поглощения ПММ

Из рис. 8 следует, что спектр поглощения матрицы в свежем молоке имеет явный пик на длине волны 540 нм. Поскольку цвет матрицы является дополнительным к цвету поглощенного излучения, пик на длине волны 540 нм соответствует сине-фиолетовому цвету матрицы. Затем, по мере обесцвечивания матрицы, пик пропадает.

Вывод. Предложена система оценки свежести пастеризованного молока на основе компьютерного зрения и алгоритма обработки цветометрических параметров индикатора свежести. Проведена оценка кислотности пастеризованного молока на основании измерения цветометрических характеристик индикатора свежести с использованием предложенной системы. Предложен новый способ в автоматизации процесса оценки качества скоропортящихся продуктов, который использует современные технологий на основе компьютерного зрения.

Список литературы

1. ГОСТ 32892-2014 Молоко и молочная продукция. Метод измерения активной кислотности.
2. D. A. Pereira de Abreu, J. M. Cruz & P. Paseiro Losada (2012) Active and Intelligent Packaging for the Food Industry, Food Reviews International, 28:2. P. 146-187, DOI: 10.1080/87559129.2011.595022
3. P. Zaragozá, A. Fuentes, I. Fernández-Segovia, J.-L. Vivancos, A. Rizo, J. V Ros-Lis, J.M. Barat, R. Martínez-Máñez, Evaluation of sea bream (Sparus aurata) shelf life using an optoelectronic nose, Food Chem. 138 (2013) P. 1374–80. Doi: 10.1016/j.foodchem.2012.10.114.
4. M. K. Morsy, K. Zor, N. Kostesha, T.S. Alstroem, A. Heiskanen, H. ElTanahi, A. Sharoba, D. Papkovsky, J. Larsen, H. Khalaf, M.H. Jakobsen, J. Emneus, Development and validation of a colorimetric sensor array for fish spoilage monitoring, Food Control. 60 (2016) 346–352. DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.07.038.
5. X.W. Huang, X.B. Zou, J.Y. Shi, Y. Guo, J.W. Zhao, J. Zhang, L. Hao, Determination of pork spoilage by colorimetric gas sensor array based on natural pigments, Food Chem. 145 (2014) P. 549–554. doi:10.1016/j.foodchem.2013.08.101.
6. Lakade, A.J., Sundar, K., Shetty, P.H., 2017. LWT - Food Science and Technology Nanomaterial-based sensor for the detection of milk spoilage. LWT - Food Sci. Technol. 75, 702–709. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.031.
7. Гавриленко М.А., Гавриленко Н.А., Способ получения полиметилметакрилата для твердофазной экстракции. Патент РФ №2638929 С, 19.12.2017 г, Бюл. 2017. №35.
8. Н. А. Гавриленко, А. В. Суханов, О. В. Мохова, Окислительно-восстановительные и кислотно-основные свойства 2,6-дихлорфенолиндофенола, иммобилизованного в полиметакрилатную матрицу // Журнал аналитической химии научно-практический журнал. 2011. Т. 65 № 1. С. 20-24.
9. Ziyaina M., Govindan B.N., Rasco B., Coffey T., Sablani S.S. Monitoring Shelf Life of Pasteurized Whole Milk Under Refrigerated Storage Conditions: Predictive Models for Quality Loss. Journal of Food Science, 2018. 83(2). P. 409–418. DOI: 10.1111/1750-3841.13981.

Воскобойникова Ольга Борисовна, старший преподаватель, vostok@tpu.ru, Россия, Томск, Томской политехнический университет,

Суханов Алексей Викторович, доцент, suhanov@tpu.ru, Россия, Томск, Томской политехнический университет,

Мамонова Татьяна Егоровна, доцент, stepte@tpu.ru, Россия, Томск, Томской политехнический университет,

Ганина Олеся Алексеевна, инженер метролог 2 категории, skripka.olesia@yandex.ru, Россия, Томск, Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран»»

COMPUTER VISION TECHNOLOGY IN ASSESSING THE FRESHNESS OF PASTEURIZED MILK

O.B. Voskoboynikova, A.V. Sukhanov, T.E. Mamonova, O.A. Ganina

The paper proposes a method for determining the acidity of milk using colorimetric analysis of the image of the color scale. This method makes it possible to evaluate the acidity of pasteurized milk based on the measurement of the colorimetric characteristics of the freshness indicator, both visually and using color registering devices. It is shown that it is possible to use computer vision technologies to determine the colorimetric parameters of the freshness indicator in order to objectively and reliably determine the quality of food products.

Key words: milk freshness indicator, computer vision technology, NI Vision Builder for Automated Inspection.

Voskoboynikova Olga Borisovna, senior lecturer, vostok@tpu.ru Russia, Tomsk, Tomsk Polytechnic University,

Sukhanov Aleksey Viktorovich, docent, suhanov@tpu.ru, Russia, Tomsk, Tomsk Polytechnic University,

Mamonova Tatyana Egorovna, docent, stepte@tpu.ru, Russia, Tomsk, Tomsk Polytechnic University,

Ganina Olesya Alekseevna, metrologist engineer of the 2nd category, skripka.olesia@yandex.ru, Russia, Tomsk, JSC «Scientific and Production Company «Mikran»»

УДК 535.65, 621.383
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-288-289

СРАВНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АДАПТИВНОГО МЕТОДА ИНТЕРПОЛЯЦИИ И МЕТОДА КИММЕЛЯ ДЛЯ ДВУХСЛОЙНЫХ МАТРИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

В.Л. Жбанова, Ю.Б. Парвулюсов

Предмет исследования – метод интерполяции матричных фотоприемников двухслойного типа. Каждый шаблон позволяет получать мультиспектральное изображение в видимом и инфракрасном диапазонах. Три шаблона, каждый из которых обладает определенной функциональностью: улучшенная работа в инфракрасном спектре или видимом диапазоне, а также шаблон с равным функциональным потенциалом. Основным достоинством разработанных систем является упрощение алгоритма интерполяции. Целью работы является разработка метода интерполяции для двухслойных матричных фотоприемников. Методы. В исследовании представлен алгоритм интерполяции для разработанных систем адаптивным методом и методом Киммеля. При использовании этих методов на стандартные шаблоны матричных фотоприемников RGBG для каждого пикселя необходимо найти два основных цвета. Для разработанных систем алгоритм упрощается: для каждой ячейки необходимо найти один недостающий основной цвета. Таким образом, уменьшается алгоритм обработки, объем необходимой памяти и, следовательно, увеличивается скорость обработки. Основные результаты. Был получен алгоритм, в котором смешаны адаптивный и линейный методы интерполяции. Применение метода Киммеля лишь немного упрощает алгоритм интерполяции стандартных систем для двухслойных из-за сложности самой методики расчета. Упрощение алгоритма можно заметить по сокращению выражений для поиска основных цветов по сравнению с системой RGBG. Таким образом, при подсчете количества уравнений и задействованных пикселей, можно сделать вывод: применение адаптивного метода для двухслойных систем упрощает алгоритм в 2 раза, а при методе Киммеля – в 1,3 раза. А если еще и учесть наличие в предложенных системах слоев для инфракрасного излучения – достоинство разработок становится очевидным. Практическая значимость. Представленный алгоритм интерполяции разработанных шаблонов позволит применять эти матричные фотоприемники для таких областей как аэрофотосъемка, зондирование земли, макросъемка.

Ключевые слова: интерполяция, матричный фотоприемник, мультиспектральное изображение, адаптивный метод, Киммеля, инфракрасный.

Введение. Наиболее популярная система пространственного цветоделения была предложена Брайсом Байером – RGBG (Red-Green-Blue-Green, красный-зеленый-синий-зеленый), на основе расположения светофильтров поверх матричного фотоприемника в шахматном порядке. Чаще всего применяют на практике абсорбционные фильтры, а также дополнительные комбинации из абсорбционных и интерференционных фильтров.

При регистрации излучения с таким типом системы цветоделения, каждая ячейка приемника регистрирует только один из основных цветов. Чтобы получить полноцветное изображение необходимо математически определять цвета недостающих основных цветов рассчитывая значения с соседних ячеек. Такое смешение называется аддитивным и достигается различными методами интерполяции [1-5]. Уже разработаны различные модификации шаблона Байера и, соответственно, методы интерполяции к ним [1, 5]. Методов интерполирования существует множество. Основой каждого алгоритма является поиск всех основных цветов каждой ячейки приемника. При этом эти методы также способны повышать разрешение или корректировать изображения на начальной стадии обработки снимка. Однако каждый метод имеет достоинства и недостатки, связанные в первую очередь со строением самого приемника. При интерполировании часто возникают «артефакты» – блюминг, алиасинг, муар-эффект и прочие. Для устранения этих явлений разрабатываются новые усложненные методики, занимающие большие объемы памяти и увеличивающие время обработки изображений.

Методы интерполяции условно можно разделить на простые и сложные. К простым методам можно отнести метод ближайшего соседа, билинейную и бикубическую интерполяции и фильтр Ланцоша [6, 7]. К сложным методам интерполяции относят алгоритмы, учитывающие адаптирующие веса интерполяции [8-10]. Такая адаптация может быть явной, и неявной, как в методе NEDI [11].

Чтобы исключить недостатки современных методов интерполирования необходимо разрабатывать новые совершенные шаблоны систем цветоделения, т.к. любое интерполирование привносит искажения в исходную информацию. Однако без таких операций в пространственных системах цветоделения не обойтись. Для получения «чистой» информации были созданы матричные фотоприемники на основе цветоделительных зеркал и цветоделительных призм [12-14]. Несмотря на результативность этих разработок, они имеют ряд недостатков: дороговизна производства, потери света в зеркалах и призмах. Также разработана многослойная система на основе кремния [15, 16]. Каждый сенсор этой системы включал чувствительные слои каждого основного цвета (красный, зеленый, синий). Такая система позволяет не применять интерполяцию, но при этом происходит сложный процесс считывания и хранения накопленного заряда, что технологически не компенсирует исключение интерполирования.

Поэтому автором статьи была предложена система цветоделения на основе двухслойных сенсоров, что позволяет не только упростить интерполирование, но и применить дополнительный инфракрасный слой для получения мультиспектрального приемника [17].

Так как разработанные шаблоны не являются типичными, необходимо разработать методику интерполяции для каждой. На примере данных трех матриц рассмотрим применение линейного, адаптивного методов и метода Киммеля [18].

Целью работы является применение интерполяции для двухслойных матричных фотоприемников. Основная задача – доказать упрощение стандартных методов интерполяции для разработанных двухслойных шаблонов.

Эти методы являются наиболее распространенными. Также математический аппарат этих методов достаточен для разработанных шаблонов, т.к. применение двух слоев в одной ячейке не будет вызывать такого муар-эффекта [19], как байеровский шаблон.

Разработанные шаблоны. Разработанные автором шаблоны матричных фотоприемников являются гибридом пространственных систем цветоделения RGBG и многослойных систем цветоделения на основе кремния Foveon X3 [15]. Представленные разработки позволяют уменьшить шумы в матричном фотоприемнике за счет уменьшения одного слоя в ячейке, при этом позволяет ввести слой регистрации инфракрасного спектра (рис. 1).

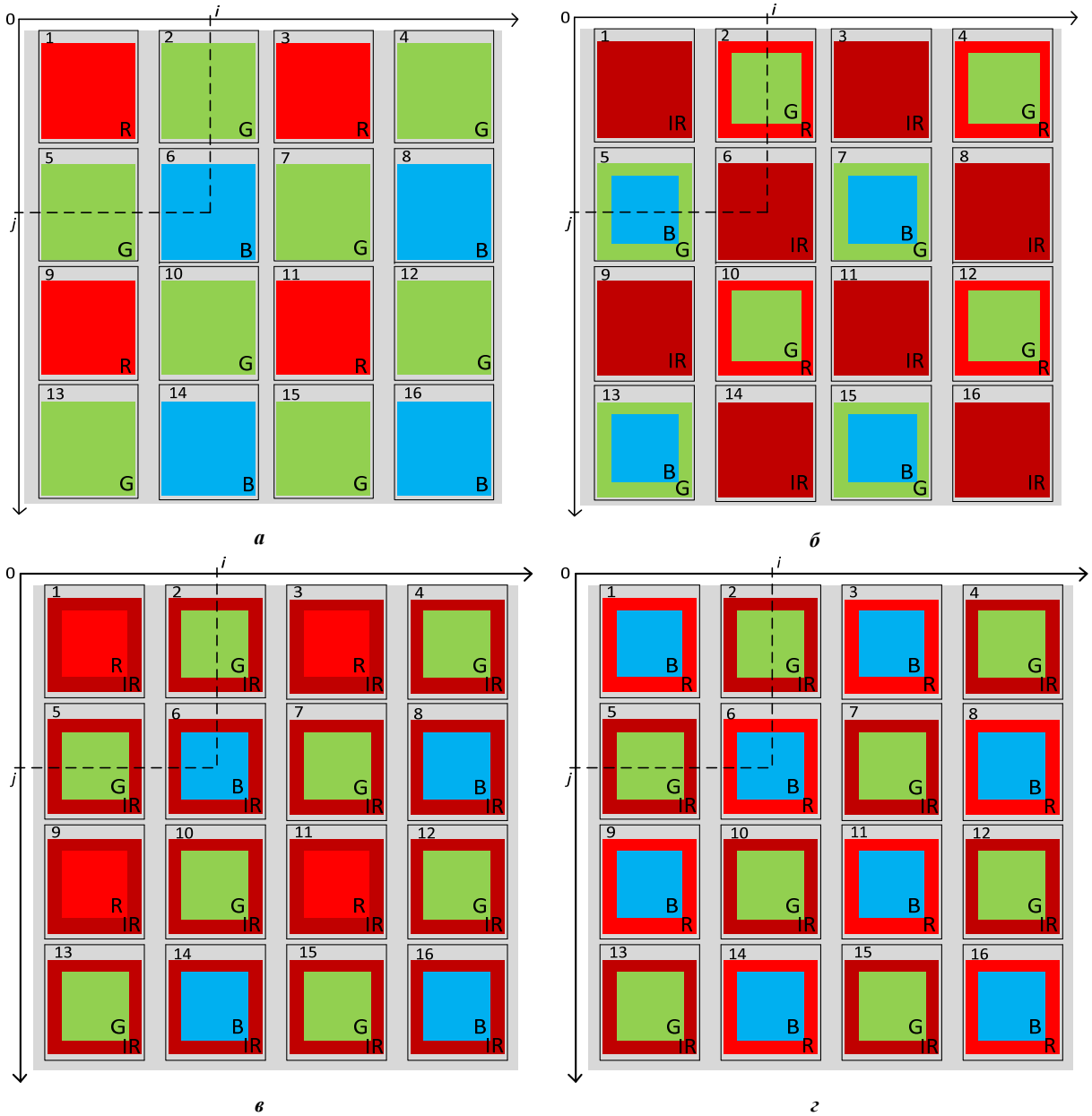


Рис. 1. Матрицы с шаблонами систем цветоделения: а – шаблон RGBG; б – шаблон-1 (Ir+GIr+Ir+BG); в – шаблон-2 (RIr+GIr); г – шаблон-3 (BR+GIr)

Шаблоны представлены в нескольких вариантах. Наиболее полная информация о разработанных шаблонах представлена в источниках [20, 21].

Первый вид шаблона представляет собой приемник, включающий однослойные ячейки с инфракрасным слоем (покрывают половину сенсора) и двухслойные ячейки с парами синего-зеленого и зеленого-красного слоев (рис. 1, б). Такой шаблон ориентирован на зрительную систему человека и регистрацию инфракрасного спектра. Тогда получается шаблон на основе четырех ячеек.

В следующем виде шаблона в каждой ячейке размещен слой регистрации инфракрасного излучения, сверху которого расположены слои синего, зеленого и красного излучения (рис. 1, в). Таким образом, реализована система RGBG на подложке для инфракрасного спектра. В этом варианте шаблон также основан на четырех ячейках.

Третий вид шаблона представляет собой приемник, сенсорная область которого поровну делится между четырьмя видами спектрального излучения (рис. 1, г). Подобный шаблон основан только на двух ячейках.

Для простоты описания методики интерполирования цвета в каждой ячейке введены координаты i и j для слоя (рис.1), тогда цвета ячейки будут иметь двухкоординатный номер: R_{ij}, G_{ij}, B_{ij}, Ir_{ij}. Кроме этого каждая ячейка пронумерована слева-направо и сверху-вниз.

Представленная методика интерполирования – одна из самых простых. Основные недостатки – изображения получаются зашумленные и включают различные артефакты. Таким образом, рассмотренный метод прост в использовании, но является достаточно грубым: значения усредняются в рамках четырех ячеек, что приводит к муар-эффекту. Поэтому необходимы методы работающие с большим количеством ячеек при поиске неизвестного основного цвета.

Применение адаптивного метода. Наиболее распространенные – адаптивные методы [3, 9-10, 18]. Существуют различные виды адаптивной интерполяции изображений, к которым также можно отнести edge-адаптивный метод (крае-адаптивный) и метод Киммеля (как разновидность адаптивного). Основой этого метода является поиск основных цветов через зеленый цвет. Чем более точно будет определен этот цвет, тем качественнее будет полноцветное изображение. Поэтому этот метод наиболее подходит для матричных фотоприемников на основе цветоделения, где превалируют зеленые светофильтры, как в шаблоне RGBG.

Рассмотрим работу адаптивного метода на разработанных шаблонах, представленных на рис. 1, а, б, в. Применение этого метода на стандартном шаблоне RGBG (рис. 1, а) подробно описано в источнике [18].

В *шаблоне-1* для 6 ячейки следует определить цвета G, R и B. Эти цвета можно рассчитать через значения двух других. При интерполяции адаптивным методом необходимо определить производные цвета *D* и веса этих цветов *E* слоев:

$$D_x(G_{22}) = \frac{G_{12} - G_{32}}{2};\ D_y(G_{22}) = \frac{G_{21} - G_{23}}{2};\ D_x(B_{22}) = \frac{B_{12} - B_{32}}{2};\ D_y(R_{22}) = \frac{R_{21} - R_{23}}{2}$$

$$E_{12} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{22}) + D^2(G_{12})}};\ E_{32} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{22}) + D^2(G_{32})}};\ E_{21} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{22}) + D^2(G_{21})}}$$

$$E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{22}) + D^2(G_{23})}}$$

Аналогично для 6 ячейки можно определить *E* и с помощью синего цвета:

$$E_{12} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{22}) + D^2(B_{12})}};\ E_{32} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{22}) + D^2(B_{32})}}$$

и красного цвета

$$E_{21} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{22}) + D^2(R_{21})}};\ E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{22}) + D^2(R_{23})}}$$

Теперь следует определить *G*:

$$G_{22} = \frac{G_{21}E_{21} + G_{12}E_{12} + G_{32}E_{32} + G_{23}E_{23}}{E_{21} + E_{12} + E_{32} + E_{23}}$$

Для этой ячейки B следует определять следующим образом:

$$B_{22} = \frac{B_{12}E_{12} + B_{32}E_{32}}{E_{12} + E_{32}}$$

Расчет значения красного цвета аналогичен расчету синего:

$$R_{22} = \frac{R_{21}E_{21} + R_{23}E_{23}}{E_{21} + E_{23}}$$

Для 7 ячейки необходимо определить R и IR. Но красный цвет адаптивным методом в данном случае определить не получится: следует применить линейный.

Параметр IR определяется следующим образом:

$$IR_{23} = \frac{IR_{13} + IR_{22} + IR_{42} + IR_{33}}{4}$$

Для 10 ячейки следует определить значение B и IR. Цвет B для этой ячейки не определяется адаптивным методом, поэтому следует применить линейный метод. Найдем *IR* для 10 ячейки также как и для 7 ячейки:

$$IR_{32} = \frac{IR_{22} + IR_{13} + IR_{33} + IR_{24}}{4}$$

Для 11 ячейки следует определить G, R, B цвета:

$$D_x(G_{33}) = \frac{G_{23} - G_{43}}{2};\ D_y(G_{33}) = \frac{G_{32} - G_{34}}{2};\ D_x(R_{33}) = \frac{R_{23} - R_{43}}{2};\ D_y(B_{33}) = \frac{B_{32} - B_{34}}{2};$$

$$E_{32} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{33}) + D^2(G_{32})}};\ E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{33}) + D^2(G_{23})}};\ E_{43} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{33}) + D^2(G_{43})}};$$

$$E_{34} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{33}) + D^2(G_{34})}}$$

Аналогично можно определить *E* и с помощью красного цвета для 11 ячейки:

$$E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{33}) + D^2(R_{23})}};\ E_{43} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{33}) + D^2(R_{43})}}$$

и синего цвета

$$E_{32} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{33}) + D^2(B_{32})}};\ E_{34} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{33}) + D^2(B_{34})}}$$

Теперь определим *G*:

$$G_{33} = \frac{G_{32}E_{32} + G_{23}E_{23} + G_{43}E_{43} + G_{34}E_{34}}{E_{32} + E_{23} + E_{43} + E_{34}}$$

Теперь найдем для этой ячейки B:

$$B_{33} = \frac{B_{32}E_{32} + B_{34}E_{34}}{E_{32} + E_{34}}$$

Аналогично, как и для B, рассчитаем R:

$$R_{33} = \frac{B_{23}E_{23} + B_{43}E_{43}}{E_{23} + E_{43}}$$

Адаптивный метод получается сложнее, но качественнее, чем линейный.

На примере *шаблона-1* рассмотрим применение адаптивного метода. Для ячеек типа 7 и 10 необходимо определить только один недостающий основной цвет красный или синий, соответственно. При этом зеленый присутствует в каждой ячейке видимого цвета, что уже упрощает поиск недостающих цветов. Подобная схема проще, чем для систем RGBG. Если же учитывать, что в предложенных шаблонах присутствует слой для инфракрасного излучения, то необходимо еще и определение IR. Однако даже этот факт не усложняет алгоритм, за счет двухслойной структуры приемника.

Для *шаблона-2* применим адаптивный метод. Схема размещения слоев в этом шаблоне аналогична RGBG, но каждый слой также регистрирует и ИК излучение, что повышает функциональность приемника.

В шаблоне для 6 ячейки применяется линейный метод. Для 7 ячейки необходимо найти цвета R и B. Определить эти цвета можно следующими способами:

1) более сложный способ, основанный на поиске показателя E;
2) упрощенный способ, основанный на элементах линейного метода.

Реализация первого способа начинается со следующего поиска:

$$D_x(B_{32}) = \frac{B_{22} - B_{42}}{2};\ D_y(R_{32}) = \frac{R_{13} - R_{33}}{2};$$

$$E_{13} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{32}) + D^2(R_{13})}};\ E_{33} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{32}) + D^2(R_{33})}};\ E_{22} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{32}) + D^2(B_{22})}}$$

$$E_{42} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{32}) + D^2(B_{42})}}$$

После того как нашли *E*, найдем теперь *R* и *B*:

$$R_{32} = \frac{R_{13}E_{13} + R_{33}E_{33}}{E_{13} + E_{33}};\ B_{32} = \frac{B_{22}E_{22} + B_{42}E_{22}}{E_{22} + E_{42}}$$

Для 10 ячейки необходимо найти красный и синий цвета:

$$D_x(R_{23}) = \frac{R_{13} - R_{33}}{2};\ D_y(B_{23}) = \frac{B_{22} - B_{24}}{2}$$

$$E_{22} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{23}) + D^2(B_{22})}};\ E_{24} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{23}) + D^2(B_{24})}};\ E_{33} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{23}) + D^2(R_{33})}}$$

$$E_{13} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{23}) + D^2(R_{13})}}$$

После того как нашли все *E*, определяются значения *R* и *B*:

$$R_{23} = \frac{R_{13}E_{13} + R_{33}E_{33}}{E_{13} + E_{33}};\ B_{23} = \frac{B_{22}E_{22} + B_{24}E_{24}}{E_{22} + E_{24}}$$

Для 11 ячейки адаптивный метод не подходит, следует использовать линейный.

Рассмотрим адаптивный метод на примере *шаблона-3*. В этом приемнике ячейкам типа 6 необходим поиск одного основного цвета – зеленого, ячейкам типа 7 – два основных цвета – синего и красного. Поиск инфракрасного требуется только для ячеек типа 6.

Определим D и E этих цветов:

$$D_x(G_{22}) = \frac{G_{12} - G_{32}}{2};\ D_y(G_{22}) = \frac{G_{21} - G_{23}}{2}$$

За счет строения матрицы, остальные значения D не требуют расчетов: $D_{xd}(B_{22}) = B_{22}$, $D_{yd}(B_{22}) = B_{22}$, $D_{xd}(R_{22}) = R_{22}$, $D_{yd}(R_{22}) = R_{22}$.

$$E_{22} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{22})}}$$

Далее определяются следующие значения E: $E_{21} = G_{21}$, $E_{12} = G_{12}$, $E_{32} = G_{32}$, $E_{23} = G_{23}$, $E_{11} = B_{11}$, $E_{33} = B_{33}$, $E_{31} = B_{31}$, $E_{13} = B_{13}$.

Для цвета G определим edge-адаптивным методом следующим образом:

$$G_{22} = \frac{G_{21}E_{21} + G_{12}E_{12} + G_{32}E_{32} + G_{23}E_{23}}{E_{21} + E_{12} + E_{32} + E_{23}}$$

Значение *IR* определим аналогично:

$$IR_{22} = \frac{IR_{21}E_{21} + IR_{12}E_{12} + IR_{32}E_{32} + IR_{23}E_{23}}{E_{21} + E_{12} + E_{32} + E_{23}}$$

Реализация второго способа начинается с поиска основных цветов для ячейки типа 7:

Найдем *D* и *E* с помощью разности цветов:

$$D_x(B_{32}) = \frac{B_{22} - B_{42}}{2};\ D_y(B_{32}) = \frac{B_{31} - B_{33}}{2};\ D_x(R_{32}) = \frac{R_{22} - R_{42}}{2};\ D_y(R_{32}) = \frac{R_{31} - R_{33}}{2}$$

Для D производится присвоение значения слоя ячейки: $D_{xd}(G_{32}) = G_{32}$, $D_{yd}(G_{32}) = G_{32}$.

Далее E присваивается значение слоя в ячейке: $E_{32} = G_{32}$, $E_{21} = G_{21}$, $E_{43} = G_{43}$, $E_{41} = G_{41}$, $E_{23} = G_{23}$, $E_{22} = B_{22}$, $E_{31} = B_{31}$, $E_{42} = B_{42}$, $E_{33} = B_{33}$.

Составим уравнение для *R* и *B* edge-адаптивным методом:

$$R_{32} = \frac{R_{31}E_{31} + R_{22}E_{22} + R_{42}E_{42} + R_{33}E_{33}}{E_{31} + E_{22} + E_{42} + E_{33}};\ B_{32} = \frac{B_{31}E_{31} + B_{22}E_{22} + B_{42}E_{42} + B_{33}E_{33}}{E_{31} + E_{22} + E_{42} + E_{33}}$$

Для 7 ячейки лучше воспользоваться edge-адаптивным методом.

В результате анализа, можно заметить, что получился алгоритм, где применяются интерполяции и адаптивного, и линейного методов.

Применение метода Киммеля. Алгоритм метода Киммеля включает в себя три этапа: 1) интерполяция зеленого цвета; 2) интерполяция красного и синего цветов с использованием интерполированного зеленого цвета; 3) стадия коррекции.

Также как и в адаптивном методе применяются промежуточные выражения: производные цвета *D* и веса этих цветов *E*. Недостающий зеленый пиксель вычисляется как линейная комбинация из 4 ближайших соседей этого пикселя. Вычисляются веса Ei в линейной комбинации из вероятности того, что искомый пиксель Gi принадлежит тому же объекту изображения, что и исследуемый. Стандартная реализация алгоритма Киммеля предполагает использование 3 итераций для коррекции красного и синего цветов [3, 18].

Применим метод Киммеля к разработанным матрицам.

Для *Шаблон-1* выражения для 6 ячейки примут вид:

$$D_{xd}(G_{32}) = \frac{G_{41} - G_{23}}{2};\ D_{yd}(G_{32}) = \frac{G_{21} - G_{43}}{2};\ D_{xd}(R_{32}) = \frac{R_{41} - R_{23}}{2};\ D_{yd}(R_{32}) = \frac{R_{21} - R_{43}}{2}$$

Найдем *E* с помощью зеленого цвета:

$$E_{32} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{23}) + D^2(G_{32})}};\ E_{21} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{21})}};\ E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{23})}}$$

$$E_{41} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{41})}};\ E_{43} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{43})}}$$

Найдем *E* с помощью красного цвета:

$$E_{32} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{23}) + D^2(R_{32})}};\ E_{21} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{32}) + D^2(R_{21})}};\ E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{32}) + D^2(R_{23})}}$$

$$E_{41} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{32}) + D^2(R_{41})}};\ E_{43} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(R_{32}) + D^2(R_{43})}}$$

Находим *R* для 7 ячейки через интерполяцию красного цвета с помощью зеленого и синего:

$$R_{32} = G_{32}\frac{E_{21}\frac{R_{21}}{G_{21}} + E_{43}\frac{R_{43}}{G_{43}} + E_{41}\frac{R_{41}}{G_{41}} + E_{23}\frac{R_{23}}{G_{23}}}{E_{21} + E_{43} + E_{41} + E_{23}};\ R_{32} = B_{32}\frac{E_{21}\frac{R_{21}}{B_{21}} + E_{43}\frac{R_{43}}{B_{43}} + E_{41}\frac{R_{41}}{B_{41}} + E_{23}\frac{R_{23}}{B_{23}}}{E_{21} + E_{43} + E_{41} + E_{23}}$$

Если определять красный цвет через синий для 7 ячейки, то первоначально необходимо найти интерполяционные значения B для ячеек 2, 4, 10, 12, что усложняет нахождение красного цвета во много раз, и использовать такое уравнение не рационально. В определении красного цвета через зеленый такого недостатка нет, так как уже известны значения зеленого цвета для 2, 4, 10, 12 ячеек.

Для 10 ячейки необходимо найти синий цвет и ИК излучение:

$$D_{xd}(G_{23})=\frac{G_{32}-G_{14}}{2};\ D_{yd}(G_{23})=\frac{G_{12}-G_{34}}{2};\ D_{xd}(B_{23})=\frac{B_{32}-B_{14}}{2};\ D_{yd}(B_{23})=\frac{B_{12}-B_{34}}{2}$$

$$E_{23}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(G_{32})+D^2(G_{23})}};\ E_{12}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(G_{23})+D^2(G_{12})}};\ E_{32}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(G_{23})+D^2(G_{32})}}$$

$$E_{14}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(G_{23})+D^2(G_{14})}};\ E_{34}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(G_{23})+D^2(G_{34})}}$$

Аналогично можно определить E и с помощью синего цвета для 10 ячейки:

$$E_{12}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(B_{23})+D^2(B_{12})}};\ E_{32}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(B_{23})+D^2(B_{32})}};\ E_{14}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(B_{23})+D^2(B_{14})}}$$

$$E_{34}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(B_{23})+D^2(B_{34})}}$$

Найдем синий цвет через зеленый и красный:

$$B_{23}=G_{23}\frac{E_{12}\frac{B_{12}}{G_{12}}+E_{34}\frac{B_{34}}{G_{34}}+E_{32}\frac{B_{32}}{G_{32}}+E_{14}\frac{B_{14}}{G_{14}}}{E_{12}+E_{34}+E_{32}+E_{14}};\ B_{23}=R_{23}\frac{E_{12}\frac{B_{12}}{R_{12}}+E_{34}\frac{B_{34}}{R_{34}}+E_{32}\frac{B_{32}}{R_{32}}+E_{14}\frac{B_{14}}{R_{14}}}{E_{12}+E_{34}+E_{32}+E_{14}}$$

Если определять синий цвет через красный для 10 ячейки, то первоначально необходимо найти интерполяционные значения R для ячеек 5, 7, 13, 15 что усложняет нахождения синего цвета во много раз, и использовать такое уравнение также не рационально. В нахождении синего цвета через зеленый этот недостаток отсутствует, так как уже известны значения зеленого цвета для 5, 7, 13, 15 ячеек.

Рассмотрим алгоритм для *Шаблон-2*. Для 6 ячейки необходимо найти зеленый цвет и красный излучение:

$$D_x(G_{22})=\frac{G_{12}-G_{32}}{2};\ D_y(G_{22})=\frac{G_{21}-G_{23}}{2};\ D_{xd}(R_{22})=\frac{R_{11}-R_{33}}{2\sqrt{2}};\ D_{yd}(R_{22})=\frac{R_{31}-R_{13}}{2\sqrt{2}};$$

$$E_{21}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(G_{22})+D^2(G_{21})}};\ E_{23}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(G_{22})+D^2(G_{23})}};\ E_{12}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(G_{22})+D^2(G_{12})}}$$

$$E_{32}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(G_{22})+D^2(G_{32})}}$$

Аналогично можем найти E и с помощью красного цвета для 6 ячейки:

$$E_{11}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(R_{22})+D^2(R_{11})}};\ E_{33}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(R_{22})+D^2(R_{33})}};\ E_{31}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(R_{22})+D^2(R_{31})}}$$

$$E_{13}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(R_{22})+D^2(R_{13})}}$$

Определим зеленый и красный цвет:

$$G_{22}=\frac{G_{21}E_{21}+G_{23}E_{23}+G_{12}E_{12}+G_{32}E_{32}}{E_{21}+E_{23}+E_{12}+E_{32}};\ R_{22}=\frac{R_{11}E_{11}+R_{33}E_{33}+R_{31}E_{31}+R_{13}E_{13}}{E_{11}+E_{33}+E_{31}+E_{13}}$$

Для 7 ячейки необходимо найти красный и синий цвета:

$$D_x(B_{32})=\frac{B_{22}-B_{42}}{2};\ D_y(R_{32})=\frac{R_{31}-R_{33}}{2};$$

$$E_{22}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(B_{32})+D^2(B_{22})}};\ E_{42}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(B_{32})+D^2(B_{42})}};\ E_{31}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(R_{32})+D^2(R_{31})}}$$

$$E_{33}=\frac{1}{\sqrt{1+D^2(R_{32})+D^2(R_{33})}}$$

После того как нашли необходимые E, перейдем к нахождению синего цвета:

$$B_{32}=\frac{B_{22}E_{22}+B_{42}E_{42}}{E_{22}+E_{42}}$$

Далее можно определить R:

$$R_{32}=\frac{R_{31}E_{31}+R_{33}E_{33}}{E_{31}+E_{33}}$$

Этим же способом найдем B через зеленый цвет:

$$B_{32}=G_{32}\frac{E_{21}\frac{B_{21}}{G_{21}}+E_{41}\frac{B_{41}}{G_{41}}+E_{23}\frac{B_{23}}{G_{23}}+E_{43}\frac{B_{43}}{G_{43}}}{E_{21}+E_{41}+E_{23}+E_{43}}$$

Для 11 ячейки необходимо найти зеленый и синий цвета:

$$D_{xd}(B_{33}) = \frac{B_{22} - B_{44}}{2\sqrt{2}};\ D_{yd}(B_{33}) = \frac{B_{42} - B_{24}}{2\sqrt{2}};\ D_x(G_{33}) = \frac{G_{23} - G_{43}}{2};\ D_y(G_{33}) = \frac{G_{32} - G_{34}}{2}$$

$$E_{22} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{33}) + D^2(B_{22})}};\ E_{44} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{33}) + D^2(B_{44})}};\ E_{42} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{33}) + D^2(B_{42})}};$$

$$E_{24} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(B_{33}) + D^2(B_{24})}};\ E_{23} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{33}) + D^2(G_{23})}};\ E_{43} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{33}) + D^2(G_{43})}};$$

$$E_{32} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{33}) + D^2(G_{32})}};\ E_{34} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{33}) + D^2(G_{34})}}$$

После того как нашли необходимые *E*, перейдем к нахождению синего цвета:

$$B_{33} = \frac{B_{22}E_{22} + B_{44}E_{44} + B_{42}E_{42} + B_{24}E_{24}}{E_{22} + E_{44} + E_{42} + E_{24}}$$

Далее можно определить R:

$$G_{33} = \frac{G_{23}E_{23} + G_{43}E_{43} + G_{32}E_{32} + G_{34}E_{34}}{E_{23} + E_{43} + E_{32} + E_{34}}$$

Рассмотрим алгоритм для *шаблона-3*. Для 6 ячейки необходимо найти зеленый цвет и ИК излучение. Найдем *D* и *E* с помощью разных цветов:

$$D_x(G_{22}) = \frac{G_{12} - G_{32}}{2};\ D_y(G_{22}) = \frac{G_{21} - G_{23}}{2}$$

Значение D определяется слоем ячейки: $D_{xd}(G_{22}) = B_{22}$, $D_{yd}(G_{22}) = B_{22}$, $D_{xd}(G_{22}) = R_{22}$, $D_{yd}(G_{22}) = R_{22}$.

$$E_{22} = \frac{1}{\sqrt{1 + D^2(G_{32}) + D^2(G_{22})}}$$

Другим значениям E присваивается значение слоя в ячейке: $E_{21} = G_{21}$, $E_{12} = G_{12}$, $E_{32} = G_{32}$, $E_{23} = G_{23}$, $E_{11} = B_{11}$, $E_{33} = B_{33}$, $E_{31} = B_{31}$, $E_{13} = B_{13}$.

Найдем зеленый цвет интерполяцией через красный и синий цвета:

$$G_{22} = R_{22}\frac{E_{11}\frac{G_{11}}{R_{11}} + E_{33}\frac{G_{33}}{R_{33}} + E_{31}\frac{G_{31}}{R_{31}} + E_{13}\frac{G_{13}}{R_{13}}}{E_{11} + E_{33} + E_{31} + E_{13}};\ G_{22} = B_{22}\frac{E_{11}\frac{G_{11}}{B_{11}} + E_{33}\frac{G_{33}}{B_{33}} + E_{31}\frac{G_{31}}{B_{31}} + E_{13}\frac{G_{13}}{B_{13}}}{E_{11} + E_{33} + E_{31} + E_{13}}$$

Сравнивания edge-адаптивный метод [21] и интерполяцию по диагонали зеленого цвета через синий и красный, более качественный и простой является edge-адаптивный. При интерполяции зеленого цвета по диагонали, предварительно необходимо найти *B* и *R* для ячеек 1,3,9,11, что усложняет нахождения зеленого цвета.

Для 7 ячейки необходимо найти красный и синий цвета:

Определим *D* и *E*:

$$D_x(B_{32}) = \frac{B_{22} - B_{42}}{2};\ D_y(B_{32}) = \frac{B_{31} - B_{33}}{2};\ D_x(R_{32}) = \frac{R_{22} - R_{42}}{2};\ D_y(R_{32}) = \frac{R_{31} - R_{33}}{2}$$

Для остальных D производится присвоение значения слоя ячейки: $D_{xd}(G_{32}) = B_{32}$, $D_{yd}(G_{32}) = B_{32}$.

Далее также, как и в предыдущих расчетах E присваиваются значения слоя в ячейке: $E_{32} = G_{32}$, $E_{21} = G_{21}$, $E_{43} = G_{43}$, $E_{41} = G_{41}$, $E_{23} = G_{23}$, $E_{22} = B_{22}$, $E_{31} = B_{31}$, $E_{42} = B_{42}$, $E_{33} = B_{33}$.

Найдем *R* и *B* интерполяцией через зеленый цвет:

$$R_{32} = G_{32}\frac{E_{21}\frac{R_{21}}{G_{21}} + E_{43}\frac{R_{43}}{G_{43}} + E_{41}\frac{R_{41}}{G_{41}} + E_{23}\frac{R_{23}}{G_{23}}}{E_{21} + E_{43} + E_{34} + E_{23}};\ B_{32} = G_{32}\frac{E_{21}\frac{B_{21}}{G_{21}} + E_{43}\frac{B_{43}}{G_{43}} + E_{41}\frac{B_{41}}{G_{41}} + E_{23}\frac{B_{23}}{G_{23}}}{E_{21} + E_{43} + E_{34} + E_{23}}$$

Сравнение методов интерполяции

Название метода	1 – RGBG; 2 – шаблон-3	Количество задействованных пикселей	Применение линейных уравнений	Применение квадратных уравнений	Упрощение в раз
Адаптивный метод	1	4	4	4	2
	2	2	2	2	
Метод Киммеля	1	6	11	4	1,3
	2	4	11	2	

В методе интерполяции через зеленый цвет есть один недостаток: необходимо для ячеек 2, 4, 10, 12 интерполировать значения *B* и *R*. Поэтому для 7 ячейки лучше воспользоваться адаптивным методом. Из представленного алгоритма видно: для половины ячеек значения E и D не требуют вычисления.

Результаты. В результате анализа интерполяции каждого шаблона, можно прийти к выводу: наиболее простого алгоритма удалось добиться при использовании *шаблон-3* (рис. 1, г). Этого можно было ожидать, так как *шаблон-1* и *шаблон-2* основаны на четырех ячейках, хотя и включают слои инфракрасного спектра.

Поэтому его можно взять как за основу при сравнении с интерполяцией шаблона байеровского типа RGBG [18]. Качественно оценить методику будет возможно при получении снимков с разработанных шаблонов.

Поэтому на данный момент можно численно сравнить разработанные и стандартные шаблоны по количеству задействованных пикселей, наличие линейных и квадратных уравнений. Таким образом, численные критерии каждого метода представлены в таблице.

Заключение. В исследовании представлен алгоритм интерполяции, разработанный автором, для шаблонов матричных фотоприемников на основе двухслойной структуры кремния. Разработанный метод основан на смешении трех методов: линейной интерполяции, адаптивного метода и метода Киммеля. Если учитывать, что адаптивный метод также использует элементы линейной интерполяции, а метод Киммеля является разновидностью адаптивного метода, то результат разработки можно обозначить следующим образом: модификация адаптивного метода под двухслойные матричные фотоприемники.

Структура самого приемника позволяет упростить устоявшиеся алгоритмы адаптивного метода за счет регистрации двух основных цветов в одной ячейки. На пример, в шаблоне-1 для ячеек типа 7 и 10 необходимо определить только один недостающий основной цвет красный или синий, соответственно. При этом зеленый присутствует в каждой ячейке видимого цвета, что уже упрощает поиск недостающих цветов. Подобная схема проще, чем для систем RGBG. Если же учитывать, что в предложенных шаблонах присутствует слой для инфракрасного излучения, то необходимо еще и определение IR. Однако даже этот факт не усложняет алгоритм, за счет двухслойной структуры приемника. Для шаблона-2 схема размещения слоев в этом шаблоне аналогична RGBG, поэтому алгоритмы будут схожи. Но каждый слой в разработанном шаблоне также регистрирует и инфракрасное излучение, что повышает функциональность приемника. В шаблоне для 6 ячейки использовать адаптивный метод нельзя, поэтому применяется линейный. Для 7 ячейки определить красный и синий цвета предложено двумя способами. В шаблоне-3 для ячейки типа 6 необходим поиск одного основного цвета – зеленого, ячейкам типа 7 – два основных цвета – синего и красного. Поиск инфракрасного требуется только для ячеек типа 6.

Тогда получаем алгоритм, в котором смешаны адаптивный и линейный методы интерполяции. Применение метода Киммеля лишь немного упрощает алгоритм интерполяции для двухслойных систем за счет сложности самой методики расчета. Упрощение алгоритма можно заметить по сокращению выражений для поиска основных цветов по сравнению с системой RGBG. Таким образом, при подсчете количества уравнений и задействованных пикселей, можно сделать вывод: применение адаптивного метода для двухслойных систем упрощает алгоритм в 2 раза, а при методе Киммеля – в 1,3 раза. А если еще и учесть наличие в предложенных системах слоев для инфракрасного излучения – достоинство разработок становится очевидным.

Представленный алгоритм интерполяции разработанных шаблонов позволит применять эти матричные фотоприемники для таких областей как аэрофотосъемка, зондирование земли, макросъемка.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00012, https://rscf.ru/project/21-79-00012/

Список литературы

1. Losson O., Macaire L., Yanqin Yang. Comparison of color demosaicing methods // Advances in Imaging and Electron Physics. 2010. pp.173-265. DOI:10.1016/S1076-5670(10)62005-8.

2. Bayer T. Color imaging array/ U.S. Patent 3,971,065 B. 1976.

3. Kimmel R. Demosaicing: image reconstruction from CCD samples [Электронный ресурс] // IEEE Trans. Image Processing, vol.8, no. 9, 1999. P. 1221-1228.

4. Ning Lu, Zhiwu Lu. Method and system for interpolating missing picture elements in a single color component array obtained from a single color sensor. U.S. Patent 5805217 A. 1998.

5. Zapryanov G., Nikolova I. Comparative Study of Demosaicing Algorithms for Bayer and Pseudo-Random Bayer Color Filter Arrays // International Scintific Conference Computer Science'2008, Technical Universiti of Sofia, Computer Systems Department, Sofia, Bulgaria. 2008. pp. 133-139.

6. Li J. A solution method for image distortion correction model based on bilinear interpolation / J. Li, J. Su, X. Zeng // Computer Optics. 2019. Vol. 43. Iss. 1. P. 99-104. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-99-104.

7. Claude Duchon. Lanczos Filtering in One and Two Dimensions // Journal of Applied Meteorology.1979. Vol. 18(8). pp. 1016-1022.

8. Gashnikov M. V. Adaptive interpolation based on optimization of a decision rule in a multidimensional feature space / M. V. Gashnikov // Computer optics. 2020. T. 44, No. 1. pp. 101-108.

9. Chervyakov N. I., Lyakhov P. A., Orazaev A. R. Two methods of adaptive median filtering of pulse noise in images // Computer optics. 2018. Vol. 42, No. 4. P. 667-678. DOI: 10.18287 / 2412-6179-2018-42-4-667-678.

10. Thanh DNH, Prasath VBS, Son NV, Hieu LM. An adaptive image inpainting method based on the modified Mumford-Shah model and multiscale parameter estimation // Computer Optics. 2019. 43(2). P. 251-257. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-251-257.

11. Li X., Orchard M.T. New Edge-Directed Interpolation // IEEE Trans. on Image Processing. 2001. Vol. 10(10). pp.1521-1527.

12. Shuai Yuan, Masahide Abe, Akira Taguchi, Masayuki Kawamata1. High accuracy WADI image interpolation with local gradient features // Conference: Intelligent Signal Processing and Communication Systems. 2005. P. 85-88. DOI:10.1109/ISPACS.2005.1595352.

13. Gray A. et al. Vertically integrated solid state color imager. U.S. Patent 4581625. 1987.

14. Harold F. Langworthy. Color sensor using dichroic mirrors to displace components. U.S. Patent 4654698. 1987.

15. Merrill R.B. Color Separation In An Active Pixel Pit Imaging Array Using A Triple-Well Structure. U.S. Patent 5,965,875. 1999.

16. Richard F. Lyon, Paul M. Hubel. Eyeing the Camera: into the Next Century // International Conference on Communications in Computing. 2002. V. 17. N 6.

17. Zhbanova V.L., Parvulyusov Yu.B., Solomatin V.A. Multispectral matrix silicon photodetectors with the IR range registration // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1679. №022039. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022039.

18. Alexey Lukin, Denis Kubasov. An Improved Demosaicing Algorithm // Graphiconí2004 conference proceedings. 2004. P. 1-8.

19. Гурьянова О. А., Филимонова Е. В. Исследование муарообразования при репродуцировании информации с применением программных методов // Прикладная информатика. 2019. 3(81). С. 113-128. DOI: 10.24411/1993-8314-2019-10020.

20. Solomatin V.A., Zhbanova V.L. Influence of photodetector-array patterns on spatial-frequency response // Journal of Optical Technology (A Translation of Opticheskii Zhurnal). 2021. 88(12). P. 722-728. DOI:10.1364/JOT.88.000722.

21. Zhbanova V.L., Parvulusov Y.B. Investigation of optical phenomena in multispectral matrix photodetector based on silicon // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2022. 22(5). P. 903-911. DOI:10.17586/2226-1494-2022-22-5-903-911.

Жбанова Вера Леонидовна, канд. техн. наук, доцент, vera-zhbanova@yandex.ru, Россия, Смоленск, Филиал Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске,

Парвулюсов Юрий Борисович, канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой parvulusov@miigaik.ru, Россия, Москва, Московский государственный университет геодезии и картографии

COMPARISON OF FEATURES OF THE ADAPTIVE INTERPOLATION METHOD AND THE KIMMEL METHOD FOR DOUBLE-LAYER MATRIX PHOTO DETECTORS

V.L. Zhbanova, Yu.B. Parvulyusov

The subject of research is the method of interpolation of two-layer type matrix photodetectors. Each template allows you to get a multispectral image in the visible and infrared range. Three templates, each with a specific functionality: improved infrared or visible performance, and a template with equal functionality. The main advantage of the developed systems is the simplification of the interpolation algorithm. The aim of this work is to develop an interpolation method for two-layer matrix photodetectors. Methods. The study presents an interpolation algorithm for the developed systems using the adaptive method and the Kimmel method. When using these methods on standard patterns of matrix RGBG photodetectors, it is necessary to find two primary colors for each pixel. For the developed systems, the algorithm is simplified: for each cell, it is necessary to find one missing primary color. Thus, the processing algorithm decreases, the amount of memory required and, consequently, the processing speed increases. Main results. An algorithm was obtained in which adaptive and linear interpolation methods are mixed. The application of the Kimmel method only slightly simplifies the interpolation algorithm for two-layer systems due to the complexity of the calculation procedure itself. The simplification of the algorithm can be seen in the reduction of expressions for finding primary colors compared to the RGBG system. Thus, when calculating the number of equations and involved pixels, we can conclude that the use of the adaptive method for two-layer systems simplifies the algorithm by about 2 times, and with the Kimmel method, by 1.23 times. And if we also take into account the presence of layers for infrared radiation in the proposed systems, the advantage of the developments becomes obvious. Practical significance. The presented algorithm for interpolation of the developed templates will allow the use of these matrix photodetectors for such areas as aerial photography, earth sounding, and macro photography.

Key words: interpolation, matrix photodetector, multispectral image, adaptive method, Kimmel, infrared.

Zhbanova Vera Leonidovna, candidate of technical sciences, docent vera-zhbanova@yandex.ru, Russia, Smolensk, Branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk,

Parvulyusov Yuriy Borisovich, candidate of technical sciences, professor, head of the department, parvulusov@miigaik.ru, Russia, Moscow, Moscow State University of Geodesy and Cartography

УДК 65.015.13; 007.52
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-297-298

МЕТОД ПОДГОТОВКИ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ НЕГАУССОВЫХ ДАННЫХ

О.Р. Кивчун

Повышение эффективности и устойчивости управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса в различных режимах функционирования энергосистемы в первую очередь зависит от качественного обоснования и принятия решения по выбору вариантов действий (управляющих воздействий), позволяющих достичь поставленные цели. Разработанный впервые метод подготовки и принятия решений при управлении электропотреблением РЭК позволяет в режиме реального времени получать, обрабатывать и верифицировать данные, а также на основе однопараметрического цифрового двойника получать детерминированные инварианты с целью формирования управляющих воздействий.

Ключевые слова: метод, принятие решений, управление, электропотребление, региональный электротехнический комплекс, негауссовые данные.

В работах [1-6] показано, что любая региональный электротехнический комплекс (РЭК) является сложной технической системой, имеющий высокотехнологичное оборудование, современные АСУ с высоким уровнем автоматизации рабочих мест. В связи с этим, а также при изменении внешних условий или возникновения внешнего управляющего воздействия существует большая вероятность внештатных ситуаций различного рода. Поэтому правильно принятое управленческое решение или команда позволят осуществить необходимое управление без нарушения технологического процесса. Однако отсутствие, необходимого опыта и знаний у технического персонала или менеджеров электроэнергетического предприятия, а также нехватка экспертов в нужной области могут критически влиять на функционирование РЭК. Поэтому одной из важных задач при управлении электропотреблением РЭК становится интеллектуализация процесса поиска эффективных решений в сложных производственных ситуациях.

Анализ [1-7, 9, 10] показал, что основными целями при управлении энергоресурсами РЭК являются обеспечение устойчивого электропотребления в различных режимах функционирования и повышение энергоэффективности на объектах. Для достижения данных целей необходимо решить ряд важных задач, которые обязательно повлияют на принятие решения. Проблема принятия научно обоснованного решения в процессе достижения поставленной цели предполагает изучение базовых философских категорий: система, объект, связь и структура, полученной качественной информации при обработке данных, а также осмысление таких явлений как объект субъектных отношений, сверхсуммарный эффект или эмерджентность, общность взаимозависимость, системность, индивидуальность, объективность. В результате исследований РЭК показано, что источником количественных сведений о нём выступают объекты, обладающие количественными свойствами [7].

Для того, чтобы повысить качество обоснования и принятия решения при управлении энергоресурсами РЭК необходимо длительное время наблюдать и исследовать его объекты. Для этого требуется в режиме реального времени получать, обрабатывать, верифицировать и визуализировать данные по энергоресурсам, а также с помощью научно обоснованных методов и методик производить расчёты интегральных показателей качества и затрат. С этой целью впервые разработан метод подготовки и принятия решений при управлении электропотреблением регионального электротехнического комплекса на основе обработки негауссовых данных (рис. 1).

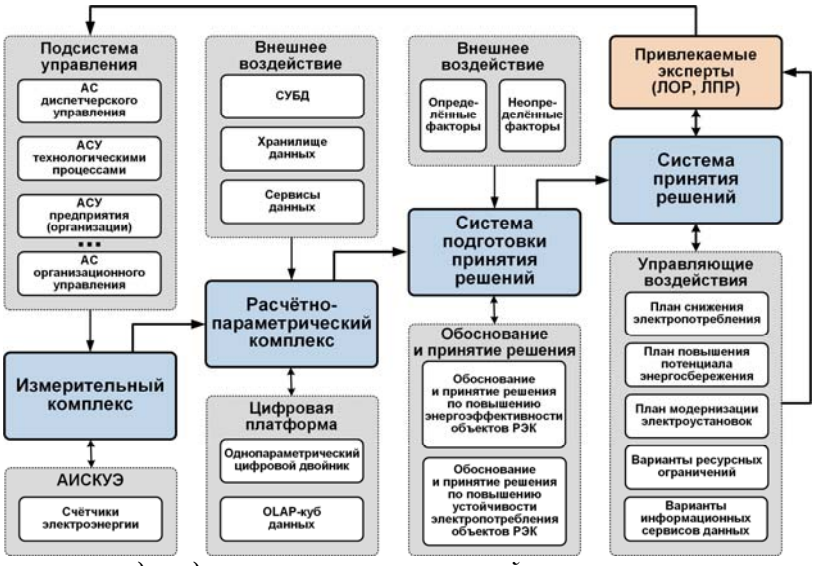


Рис. 1. Структура метода подготовки и принятия решений при управлении электропотреблением регионального электротехнического комплекса на основе обработки негауссовых данных

Его основу составляет математический аппарат векторного рангового анализа (ВРА) [1, 6], с помощью которого осуществляется обработка данных по электропотреблению с целью их фиксации, последующей аналитической обработки, агрегирования и преобразования в управляющие воздействия. На первоначальном этапе с помощью измерительно-

го комплекса (ИК) осуществляется сбор сведений об электропотреблении от датчиков автоматизированных систем контроля и учёта электроэнергии (АИС КУЭ). ИК представляет собой совокупность средств, методов и вспомогательных устройств, предназначенных для волнения задач измерения энергоресурсов [7]. Также он позволяет в режиме реального параметризировать сведения об электропотреблении РЭК и формировать базу данных по электропотреблению.

В структуре метода, представленного на рисунке 1, исследование и обработка данных по электропотреблению начинается тогда, когда они проходят этапы проверки, верификации и представления. Представление данных подразумевает под собой их запись на жёсткий диск или другое устройство с целью дальнейшего просмотра на компьютере. Далее данные по электропотреблению импортируются в процедурный комплекс (ПК), который представляет собой совокупность средств, методов и вычислительных процедур для выполнения расчетных задач при управлении электропотреблением [7]. В итоге, обработка первичных данных, полученных в процессе измерения, позволяет получить необходимые вторичные данные, которые являются результатами работы расчётно-параметрического комплекса (РПК). Он представляет собой совокупность специального программного обеспечения, позволяющего исследовать, обрабатывать и трансформировать данные полученные в ИК. Данные в РПК могут описывать один или несколько параметров. В зависимости от этого в РПК реализуются методы, позволяющие обрабатывать как многопараметрические, так и однопараметрические данные. Его основной задачей является формирование детерминированных инвариантов, которые в дальнейшем станут основной для подготовки и принятия решений при управлении энергоресурсами. В качестве инвариантов используются параметры формы кривых векторных ранговых распределений, построенных по имеющимся расчетным данным [6, 7].

Следующими важными элементами алгоритма являются системы подготовки и принятия решений. Известно, чтобы решить любую управления необходимо правильно сформулировать её цели. При управлении электропотреблением объектов РЭК их две: обосновать и принять решение для выбора необходимых инструментов, позволяющих повысить энергоэффективность объектов РЭК и обеспечить устойчивость электропотребления. Учитывая сложность структуры РЭК, где будет реализован алгоритм, целесообразно для обоснования и принятия решений использовать принципы системного подхода. Рассмотрим подробнее данный этап.

В работах [8, 9] показано, что для вывода решений в проблемных ситуациях часто используется метод на основе рассуждений по прецедентам (Case-based reasoning, CBR). Данный метод зарекомендовал себя с наилучшей стороны на различных объектах электроэнергетики в ситуациях, обусловленных наличием исходных негауссовых данных и слабой формализации критериев, не позволяющих применять строгие математические модели и методы оптимизации. Преимуществами метода является возможности быстрого вывода, поиска и принятия решений в условиях слабой формализации и неопределенности, а также высокое качество принимаемых решений. Однако для реализации данного метода необходима чёткая формализация сложившейся ситуации и база знаний, позволяющая осуществить выбор ситуаций [8].

На основе исследований в [1, 6] показано, что применение методов ВРА позволяет с высоким качеством, на основе негауссовых данных, формально описать сложившуюся ситуацию при управлении электропотреблением РЭК. В связи с этим разработан алгоритм принятия решений при управлении электропотреблением РЭК на основе рассуждений по прецедентам. Процесс принятия решения на основе рассуждений по прецедентам при управлении электропотреблением объектов РЭК включает в себя следующие этапы: постановка задачи, анализ проблемной ситуации, постановка и решение задачи (рис. 2).

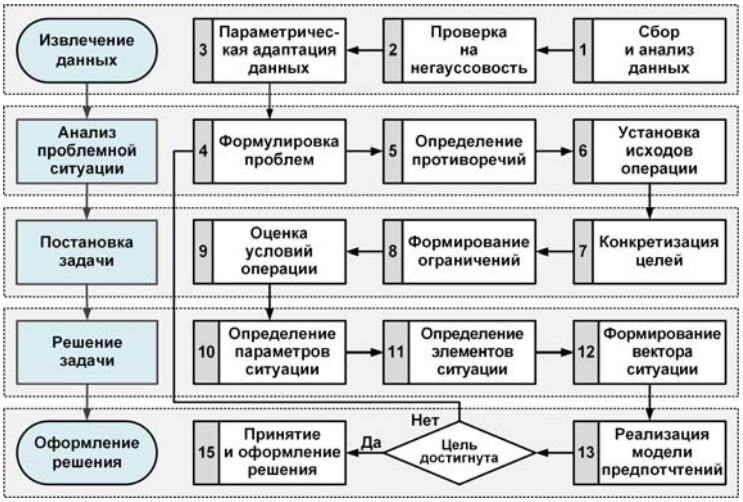


Рис. 2. Система принятия решения в процессе управления электропотреблением

На первоначальном этапе алгоритма осуществляется извлечение данных по электропотреблению. Источником данных служит OLAP-куб, сформированный в РПК. В качестве ограничений следует считать, что исходные данные уже прошли процедуру параметрической адаптации данных и импортированы за необходимы временной интервал.

Анализ проблемной в данном случае предполагает под собой формулировку задачи, которую необходимо решить при сложившемся прецеденте, а также планирование исходов операции. На следующем этапе осуществляется конкретизации целей, формирование ограничений и оценка условий операции.

Решение задачи принятия решения при управлении электропотреблением объектов РЭК реализуется на основе метода CBR. Основная идея данного метода заключается в исследовании и анализе прецедентов на основе пары «Sit, Sol», где выражение «Sit» – формально описанная ситуация, сложившаяся в процессе управления электропотреблением объектов РЭК, а «Sot» – решение, предлагаемое экспертным методом в данной ситуации [8]. Такие пары могут быть разработаны для разных областей управления. В данном случае пары «Sit, Sol» разработаны для управления корпоративными и обеспечивающими РЭК с целью принятия качественного решения по повышению энергоэффективности на объектах, а также для территориального РЭК, для которого принимаются решения по обеспечению устойчивого электропотребления в энергосистеме. Данные пары «Sit, Sol» образуют базу знаний для исследования конкретного процесса управления. Соответственно система принятия решений отбирает наиболее схожую пару «Sit_n, Sol_m», позволяющую принять наилучшее решение. Условие отбора схожих ситуаций можно записать с помощью функции sim в следующем виде:

$$\text{Sit}_n = \arg\max \text{Sim}(\text{Sit}_1, \text{Sit}_m), \tag{1}$$

где Sit_1 – исследуемая проблемная ситуация; Sit_m – схожая ситуация из базы знаний; Sim – функция схожести двух ситуаций; $\arg\max$ – оператор, возвращающий наибольшее значение функции.

Реализация выражения (1) в процессе управления РЭК дополняется ограничением, представляющим собой значения нижней границы области допустимых значений (ОДЗ), которые являются индикатором сохранения технологического процесса на объектах РЭК. Аналитически данное ограничение представляется следующим образом:

$$\text{Sim}(\text{Sit}_1, \text{Sit}_m) \geq \text{A}^3_{\langle p \rangle} \tag{2}$$

где $\text{A}^3_{\langle p \rangle}$ – множество нижних допустимых значений для векторного рангового распределения по параметру.

Таким образом, в результате многократного применения CBR-метода в процессе принятия решений при управлении электропотреблением объектов РЭК накапливается большая база знаний пар «Sit, Sol», несмотря на то, что исследуется один параметр. Это связано с тем, что исходные данные формируются на различных временных интервалах. Кроме того, в энергосистемах управление может быть оперативным, среднесрочным или долгосрочным. Соответственно, с целю разработки системы принятия решений на основе CBR-метода для РЭК в полном объёме, учитывая все виды управления оценка схожести пар «Sit, Sol» определяется тогда с помощью метрик расстояния в многомерном пространстве. Однако, в данном случае, следует понимать, что количество значений параметра всегда будет стремиться к бесконечности, в связи с чем, рекомендуется использовать методы векторного рангового анализа. Векторный критерий выбора пар «Sit, Sol» в данной ситуации представляется в следующим виде:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{\text{Sim}} = \arg\max < \overrightarrow{\text{Sim}_1}(\text{Sit}_1, \text{Sit}_m), ..., \overrightarrow{\text{Sim}_k}(\text{Sit}_1, \text{Sit}_m), \\ ..., \overrightarrow{\text{Sim}_N}(\text{Sit}_1, \text{Sit}_m) > .\end{aligned} \tag{3}$$

Для определения каждой локальной функции Sim формируется своя метрика и извлекаются из OLAP-куба определённые слои данных. ЛПР в каждой сложившейся ситуации необходимо знать какая локальная функция Sim наиболее подходит. Это возможно сделать на основе опыта экспертов, принимающих решение или создать программы обучения на основе искусственного интеллекта.

В [8] представлен пример формализации представления ситуации сложного технического объекта. Авторы привели в качестве такого объекта «умную ферму». Используя некоторые аспекты при формализации ситуации, получен следующий кортеж множеств, характеризующий управление электропотреблением РЭК:

$$\mathbf{H}_{\text{rek}} = \langle \mathbf{W}, \mathbf{S}, \mathbf{L}, \mathbf{T} \rangle, \tag{4}$$

где $\mathbf{W}$ – множество значений по электропотреблению; $\mathbf{S}$ – множество состояний параметра; $\mathbf{L}$ – множество оцениваемых параметров; $\mathbf{T}$ – упорядоченное множество категориальных значений параметра при управлении электропотреблением.

Множество значений по электропотреблению представляет собой совокупность векторов $\mathbf{W} = \left(w_i \mid \forall i \in [1; N] \right)$, представленных в ВРП и на основе которых строятся ВРР. Смысл принятия решений при управлении электропотреблением заключается в обоснованном выборе наилучшего значения электропотребления для исследуемого ВРР. Для этого строится ОДЗ, которая в ВРП представляется следующим выражением:

$$\left\{ \mathbf{A}_\mathbf{k} \right\}_{k=1}^{n} = \left\{ \text{A}^1_{\langle m \rangle} \bigcup \text{A}^2_{\langle k \rangle} \bigcup \text{A}^3_{\langle p \rangle}; \text{A}^1_{\langle m \rangle} \bigcap \text{A}^2_{\langle k \rangle} \bigcap \text{A}^3_{\langle p \rangle} \notin \varnothing \right\}, \tag{5}$$

где $\text{A}^1_{\langle m \rangle}$ – подмножество верхних значений ОДЗ; $\text{A}^2_{\langle k \rangle}$ – подмножество значений параметра внутри ОДЗ; $\text{A}^3_{\langle p \rangle}$ – подмножество нижних значений ОДЗ.

Значения электропотребления в ВРП могут принимать различные состояния выше, внутри и ниже ОДЗ. Это зависит от временного интервала на котором принимаются решения. В общем виде состояния значений электропотребления могут быть записаны следующим образом:

$$\mathbf{S}_j = \left\{ s_j \mid \forall j \in [1, N] \right\}. \tag{6}$$

Ситуация при управлении электропотреблением также может характеризоваться дополнительными оцениваемыми параметрами, которые представляют множество $\mathbf{L} = \left\{ l_k \mid \forall k \in \left[1, N_p \right] \right\}, k \in \{ K_i \}$, где K_i – подмножество индексов, имеющих отношение к i-му элементу, N_p – число оцениваемых параметров. Для оцениваемых параметров при управлении формируется множество категориальных значений k-го параметра

$\mathbf{T} = \left\{ t_m \mid \forall m \in \left[1, N_p \right] \right\}$. Категории для параметров задаются лингвистическим образом. Например, «Наличие отклонений», «Наличие ошибок», «Снижение» и т.д.

При оценке состояния элемента присваивается логическое значение. Значение «1» относится к истинному событию или элемент находится в заданном состоянии, «0» – событие не произошло или элемент не находится в заданном состоянии. Данная операция осуществляется для каждого оцениваемого параметра при управлении электропотреблении объектов РЭК. После оценивания всех параметров формируется вектор ситуации, который предполагает их совокупность.

Объектом, где предлагается реализовать CBR-метод, является РПК, позволяющий автоматизировать анализ, обработку, хранение, преобразование и передачу, взаимосвязанной совокупности данных по электропотреблению. Также необходимо напомнить, что анализ ситуаций при управлении электропотребление объектов РЭК осуществляется в раках достижения двух целей.

Для достижения первой цели: повышения оперативности, обоснованности и качества управления электропотреблением для улучшения энергоэффективности оцениваемые элементы комплексной ситуации объединены в следующие группы: «Мониторинг», «Обеспечение эффективного управления», «Снижение электропотребления» (табл. 1).

Таблица 1

Пример ситуации с неточными параметрами при управлении с целью повышения энергоэффективности

Sit	Элементы и параметры	Отклонения	Ошибки	Объекты выше ОДЗ	Объекты внутри ОДЗ	Объекты ниже ОДЗ	Процент снижения	Коэффициент снижения
Мониторинг электропотребления	Интер-вальное оцени-вание	1	0		1			
	Прогнози-рование	0	1		1			
	Норми-рование	1	0		1			
Обеспечение эффективного управления	Комплек-сный алгоритм № 1			1	0	0		
	Комплек-сный алгоритм № 2			0	0	0		
	Комплек-сный алгоритм № 3			0	0	1		
Снижение электропотреб-ления	Распоря-жение руково-дителя						1	0
	Комплек-сный алгоритм № 4						1	0
Вектор ситуации		101	010	100	111000	001	11	00
Состояние качества		Сред-нее	Сред-нее	Сред-нее	Низкое	Сред-нее	Высо-кое	Низкое

Для каждой сложившейся ситуации исследуемая группа характеризуется набором элементов и значениями их оцениваемых параметров. Например, группа «Мониторинг» включает в себя элементы: «Интервальное оценивание», «Прогнозирование», «Нормирование», а оцениваемые параметры «Отклонения», «Ошибки», «Объекты выше ОДЗ». Данные параметры в таблице 1 представлены в лингвистическом виде. Однако расчётная система на основе метрик примет логическое решение для оценки параметра. Аналитическое описание оцениваемых параметров и их логический выбор представлены в [2] при описании метода управления электропотреблением объектов РЭК на основе синтеза процедур рангового анализа.

При достижении второй цели: повышения оперативности, обоснованности и качества управления электропотреблением на основе обеспечения устойчивости электропотребления аналогичным образом составляется таблица 2. Методологической основой для их формирования является, представленный в [3], метод управления электропотреблением объектов РЭК на основе добавочного ресурса.

Итогом реализации логического обоснования решения в таблицах 1 и 2 является формирование «Вектора ситуации» и оценка состояния качества для каждого параметра элементов группы. На основе «Вектора ситуации» ЛПР принимает решение о формировании управляющих воздействий для объектов РЭК в рамках заданной цели.

Оценка работоспособности CBR-метода осуществлялась на основе метрик, формируемых с помощью дифлекс-параметров, ранговой топологической меры и добавочного ресурса.

Таблица 2

Пример ситуации с неточными параметрами при управлении с целью обеспечения устойчивости электропотребления

Sit	Элементы и параметры	Ограничение ресурса	Увеличение затрат	Необходимость модернизации электроустановок	Отклонения частоты	Отклонения частоты	Отклонения частоты
Мониторинг конверсии	Интер-вальное оценивание	1	1	1			
	Оценка Z1-потенциала	1	0	1			
	Оценка Z2-потенциала	1	1	0			
Обеспечение устойчивого электропотреб-ления	Введение R3-режима				1	1	1
	Введение R2-режима				0	1	1
	Введение R1-режима				0	0	1
Вектор ситуации		111	101	110	100	110	111
Состояние качества		Высокое	Среднее	Среднее	Низкое	Среднее	Высокое

Для проверки наличия ошибок прогнозирования использовались следующие метрики: sa – суммарная абсолютная ошибка по РЭК, кВт·ч; $\overline{\mathrm{so}}$ – средняя относительная ошибка, %; mo – максимальная относительная ошибка, % [1, 6]. Их аналитический вид представлен в выражении (7). Следующей метрикой является относительный дифлекс-параметр, который рассчитывается по следующему выражению:

$$\mathbf{W}_{\mathrm{ODP}} = \left\{ \mathrm{w}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{odp}} \right\}_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{n}} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{n}} \frac{\left| \mathbf{w}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{odp}} \right|}{\left| \mathbf{r}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{k}} \right|}; \mathbf{w}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{odp}}, \mathbf{r}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{k}} \in \mathbf{VR}, \tag{7}$$

где $\left| \mathbf{w}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{odp}} \right|$ – значение дифлекс-параметра; $\left| \mathbf{r}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{k}} \right|$ – значение выше нижнего допустимого значения ОДЗ.

Проверка заданного уровня снижения электропотребления проверятся на основе расчёта коэффициента снижением электропотребления [1, 6]:

$$\frac{\left(\mathbf{w}_{\langle \mathrm{i} \rangle} \right)^{\mathrm{T}} - \left(\mathbf{d}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{sr}} \right)^{\mathrm{T}} \cdot \left(\mathrm{E}_1 - \mathrm{k}_2 \cdot \mathbf{w}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{ODP}} \right) + \left(\mathbf{d}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{srn}} \right)^{\mathrm{T}} \cdot \mathrm{E}_2}{\left(\mathbf{w}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{D}} \right)^{\mathrm{T}}} = 0{,}03;$$

$$\mathbf{w}_{\langle \mathrm{i} \rangle} \in \mathbf{W}; \mathbf{d}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{sr}} \in \mathbf{D}_{\mathrm{sr}}; \mathbf{w}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{ODP}} \in \mathbf{W}_{\mathrm{ODP}}; \mathbf{d}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{srn}} \in \mathbf{D}_{\mathrm{srn}}, \tag{8}$$

где $\mathbf{w}_{\langle \mathrm{i} \rangle}$ – вектор фактических значений электропотребления; $\mathbf{d}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{sr}}$ – вектор среднего прогнозных значений и норм выше нижнего допустимого значения ОДЗ; $\mathbf{d}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{srn}}$ – вектор среднего прогнозных значений и норм ниже нижнего допустимого значения ОДЗ; $\mathrm{E}_1, \mathrm{E}_2$ – вектора единиц; k – коэффициент управления снижением электропотребления; $\mathbf{W}$ – множество фактических значений электропотребления; $\mathbf{D}_{\mathrm{sr}}$ – множество среднего прогнозных значений и норм; $\mathbf{W}_{\mathrm{ODP}}$ – множество значений относительных дифлекс-параметров; $\mathbf{D}_{\mathrm{srn}}$ – множество среднего прогнозных значений и норм ниже нижнего допустимого значения ОДЗ; $\mathbf{w}_{\langle \mathrm{i} \rangle}^{\mathrm{ODP}}$ – вектор ОДП для объектов выше нижней границы ОДЗ.

Метрикой, позволяющей определить качество оценки потенциала энергосбережения, является показатель конверсии. Он предназначен для анализа полученных премиальных средств при проведении мероприятий по организации повышения энергосбережения. Рассчитать его можно следующим образом:

$$IL_{k\tau} = \frac{W_{k\tau} - W_{k\tau+1}}{\overline{C}_{k\tau}^{PL}}, \quad (9)$$

где $IL_{k\tau+1}$ – параметр конверсии; $W_{k\tau}$ – электропотребление; $\overline{C}_{k\tau}^{PL}$ – количество выделенных денежных средств на энергосбережение.

В таблице 3 приведены метрики используемые для оценки работоспособности элементов групп для ситуации представленных в таблицах и 2.

Таблица 3

Распределение метрик при оценивании элементов ситуации

Sit	Элементы и метрики	Ошибки прогно-зи-рования	Относитель-ный дифлекс-параметр	Коэффициент снижения электропо-требления	Показатель конверсии
Мониторинг	Интервальное оценивание		+		
	Прогнозирование	+			
	Нормирование		+		
Обеспечение эффективного управления	Комплексный алгоритм № 1	+	+		
	Комплексный алгоритм № 2	+	+		
	Комплексный алгоритм № 3	+	+		
Снижение электропотреб-ления	Распоряжение руководителя		+		
	Комплексный алгоритм № 4			+	+
Мониторинг конверсии	Интервальное оценивание		+		
	Оценка Z1-потенциала				+
	Оценка Z2-потенциала				+
Обеспечение устойчивого электропотребления	Введение R3-режима		+		
	Введение R2-режима		+		
	Введение R1-режима		+		

Реализация этапов принятия решений на основе CBR-метода осуществлялась с помощью специального программного обеспечения, разработанного в средах Mathcad и Visual Studio. Для разработки интерфейсов приложений использовался язык программирования C#. Совокупность всех модулей специального программного обеспечения включена в ПАК мониторинга электропотребления объектов РЭК, разработанного в рамках НИР «Монитор» [28].

Таким образом, важным этапом процесса управления электропотреблением РЭК в различных ситуациях является подготовка и принятие решений в соответствии с поставленными целями. На основе методов ВРА и CBR-метода, основанного на рассуждениях по прецедентам в сложившейся ситуации, впервые разработана система подготовки и принятия решений при управлении электропотреблением объектов РЭК в различных условиях функционирования.

Отличительной особенностью системы является логико-математический аппарат обоснования и принятия решений, позволяющий, в отличии от других методов, определить элементы комплексной ситуации и объединить их в логические группы; на основе методов ВРА ввести для каждого элемента группы оцениваемые параметры; используя лингвистический аппарат логического суждения, определить итоговый «Вектор ситуации» для формирования необходимых управляющих воздействий.

Для проверки работоспособности системы подготовки и принятия решений при управлении электропотреблением объектов РЭК в различных условиях функционирования использованы метрики, основанные на расчётах ошибок прогнозирования, относительного дифлекс-параметра, коэффициента снижения электропотребления и показателей конверсии.

Список литературы

1. Кивчун О.Р. Метод векторного рангового анализа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 11. С. 131-139.

2. Кивчун О.Р. Метод управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса на основе синтеза процедур рангового анализа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 500-513.

3. Кивчун О.Р. Метод управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса на основе учёта добавочного ресурса // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4-4 (54). С. 65-72.

4. Кивчун О.Р. Область допустимых значений векторного рангового распределения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 11. С. 188-193.

5. Кивчун О.Р. Статическая модель управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса на основе синтеза процедур рангового анализа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 2. С. 552-559.

6. Кивчун О.Р. Векторный ранговый анализ [Трактат] / О.Р. Кивчун. –Первое издание. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2019]. – Режим доступа: http://gnatukvi.ru/vran.pdf, свободный.

7. Гнатюк В.И. Знания, информация, данные в управлении СЭТ-систем [Основные понятия, термины и определения] / В.И. Гнатюк. – Электронные текстовые данные. Калининград: [б.и.], [2022]. [Электронный ресурс]: http://gnatukvi.ru/index.files/inf_dann_upr.pdf (дата обращения: 10.05.2023).

8. Глухих И.Н., Прохошин А.С., Глухих Д.И. Сравнение и отбор ситуаций в системах вывода решений на прецедентах для «умной» фермы // Информатика и автоматизация. 2023. Том 22 № 4. С. 853-879.

9.Management Software Power Consumption During Operation Objects of Technocenological Type / V. Gnatyuk [and others] // Lecture Notes in Networks and Systems, 2023, 626 LNNS. P. 149 – 157.

10. Mathematical model of parametric virtualization of technocenosis data / V. Gnatyuk [and others] // CEUR Workshop Proceedings, 2021, 2922. P. 90–99.

Кивчун Олег Романович, канд. техн. наук, доцент, oleg_kivchun@mail.ru, Россия, Калининград, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

METHOD OF PREPARATION AND DECISION-MAKING WHEN MANAGING POWER CONSUMPTION REGIONAL ELECTROTECHNICAL COMPLEX BASED ON NON-GAUSSIAN DATA PROCESSING

O.R. Kivchun

Improving the efficiency and sustainability of power consumption management of regional electrical facilities in various modes of operation of the power system primarily depends on the qualitative justification and decision-making on the choice of options for actions (control actions) to achieve the goals. Developed for the first time, the method of preparation and decision-making in the management of power consumption of REC allows to receive, process and verify data in real time, as well as on the basis of a one-parameter digital double to obtain deterministic invariants in order to form control actions.

Key words: method, decision-making, management, power consumption, regional electrotechnical complex, non-Gaussian data.

Kivchun Oleg Romanovich, candidate of technical sciences, docent, oleg_kivchun@mail.ru, Russia, Kaliningrad, Immanuel Kant Baltic Federal University

УДК 330.4
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-304-305

УСЕЧЕННЫЙ МЕТОД АНТИРОБАСТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ В РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ

С.И. Носков, Т.К. Кириллова, А.Р. Чекалова

В работе поставлена более общая задача по сравнению с той, которая соответствует методу антиробастного оценивания параметров линейной регрессионной модели, состоящая в минимизации максимальной ошибки аппроксимации для группы наблюдений, выделенной из заданной полной выборки данных, с одновременной минимизацией суммы абсолютных отклонений расчетных значений зависимой переменной от фактически заданных для оставшихся наблюдений. Соответствующий метод предложено называть усеченным методом антиробастного оценивания. Показано, что его реализация сводится к решению задачи линейного программирования приемлемой для практических ситуаций размерности. Решен простой численный демонстрационный пример.

Ключевые слова: линейная регрессионная модель, расстояние Чебышева, ошибки аппроксимации, задача линейного программирования, методы наименьших модулей и антиробастного оценивания параметров.

В практике математического моделирования сложных объектов различного характера активно используется расстояние (метрика) Чебышева. Так, в работе [1] предложена полиномиальная нейронная сеть Чебышева для прогнозирования на один день вперед трех различных наборов данных для стоимости чистых активов, принадлежащих трем ведущим индийским финансовым компаниям. Управляющие параметры сети оцениваются с помощью интеллектуального метаэвристического алгоритма. В [2] отмечено, что для подгонки кривых или поверхностей к наблюдаемым или измеренным данным общим критерием является регрессия по ортогональному расстоянию. В работе рассматривается естественное обобщение частной постановки этой задачи, предполагающее замену метода наименьших квадратов нормой Чебышева. Например, этот критерий может быть более подходящим в контексте решений о приемке/отбраковке изготовленных деталей. Сформулированная проблема имеет некоторые интересные особенности - она имеет много структур, которые можно использовать, но, как правило, полученное решение не является уникальным. В статье [3] введено новое понятие универсально оптимального плана эксперимента, актуальное с точки зрения адаптивного непараметрического оценивания. Показано, что как дискретные, так и непрерывные планы Чебышева универсально оптимальны в задаче подбора правильно взвешенных алгебраических полиномов к случайным данным. Результат является прямым следствием известной связи между полиномами Чебышева и тригонометрическими функциями. В работе [4] описывается метод компенсации комплексных геометрических и тепловых погрешностей станков. Вначале с помощью метода однородной матрицы преобразования создается синтезированная объемная модель с учетом как геометрических, так и тепловых эффектов. Затем, чтобы повысить точность моделирования и эффективность геометрических составляющих ошибок, предлагается алгоритм автоматического моделирования с использованием ортогональной регрессии наименьших квадратов на основе полинома Чебышева. В работе [5] указано, что понятия расстояния и сходства играют ключевую роль во многих подходах к машинному обучению и искусственному интеллекту в целом, поскольку они могут служить организующим принципом, с помощью которого люди классифицируют объекты, формируют концепции и делают обобщения. В то время как функции расстояния для пропозициональных представлений были тщательно изучены, работа над функциями расстояния для структурированных представлений, таких как графы, фреймы или логические предложения, проводилась в различных сообществах и гораздо менее понятна. В частности, значительный объем работы, требующий использования функции расстояния или сходства для структурированных представлений данных, обычно использует специальные функции для конкретных приложений. Дан обзор результатов по данной проблематике. Статья [6] посвящена новому методу кластеризации данных, который сочетает в себе расстояние Минковского с расстоянием Чебышева. Достаточно большой и сложный объем данных становится одной из трудностей при проведении анализа многомерных данных. Чтобы преодолеть эту проблему, одним из используемых способов является уменьшение размеров выборок данных с использованием анализа главных компонент.

Минимизация максимальной ошибки аппроксимации для группы наблюдений. В работах [7-9] развит метод антиробастного оценивания (МАО) параметров линейной регрессионной модели вида:

$$y_k = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k,\ k \in P = \{1,2,\dots,n\}, \quad (1)$$

где y − зависимая, а x_i − *i*-ая независимая переменные, α_i − *i*-ый подлежащий оцениванию параметр, ε_k − ошибки аппроксимации, k − номер наблюдения, n − длина выборки данных. Будем считать все переменные и ошибки уравнения (1) детерминированными.

Представим уравнение (1) в векторной форме:

$$y = X\alpha + \varepsilon,$$

где $y = (y_1,\dots,y_n)^T$, $\alpha = (\alpha_1,\dots,\alpha_m)^T$, $\varepsilon = (\varepsilon_1,\dots,\varepsilon_n)^T$, X− $(n \times m)$ − матрица с компонентами x_{ki}.

Идентификация неизвестных параметров модели (1) с помощью основанного на расстоянии Чебышева между расчетными и фактическими значениями зависимой переменной метода антиробастного оценивания производится путем решения следующей оптимизационной задачи:

$$J(\alpha) = \min \max_{k \in P} |\varepsilon_k|. \quad (2)$$

Такое название метода вызвано его тяготением к выбросам (наблюдениям, не согласующимся с выборкой в целом), в отличие от робастных методов, слабо реагирующих на выбросы или вообще их игнорирующих. К последним относится, например, метод наименьших модулей (МНМ) (см., например, [10-12]).

В [7] показано, что задача (2) может быть сведена к задаче линейного программирования (ЛП) следующим образом.

Введем в рассмотрение неотрицательные переменные $u_k, v_k, k \in P$:

$$u_k = \begin{cases} \varepsilon_k, & \text{если } \varepsilon_k > 0 \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$v_k = \begin{cases} -\varepsilon_k, \text{если } \varepsilon_k < 0 \\ 0, \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда модель (1) можно представить в виде системы линейных равенств и условий неотрицательности переменных:

$$\sum_{i=1}^{m} \alpha_i x_{ki} + u_k - v_k = y_k, k \in P, \quad (3)$$

$$u_k \geq 0, v_k \geq 0, k \in P. \quad (4)$$

Введем максимальную по модулю ошибку аппроксимации *r*:

$$r = \max_{k \in P} |\varepsilon_k|.$$

Тогда справедлива система линейных неравенств

$$u_k + v_k - r \leq 0, k \in P, \quad (5)$$

причем для какого-то наблюдения имеет место строгое равенство. Таким образом, задача (2) сводится к задача ЛП с ограничениями (3) – (5) и целевой функцией

$$r \to \min. \quad (6)$$

Поставим задачу более общим образом. Выделим из индексного множества исходных номеров наблюдений P некоторое его усечение - подмножество $P_1 \subseteq P$. Переформулируем задача (2), потребовав минимизации максимальной ошибки аппроксимации на наблюдениях из P_1 с одновременной минимизацией суммы абсолютных отклонений для оставшихся наблюдений – из множества $P \backslash P_1$:

$$J_1(\alpha) = min\ (\max_{k \in P_1} |\varepsilon_k| + \rho \sum_{k \in P \backslash P_1} |\varepsilon_k|), \quad (7)$$

где ρ – наперед заданная малая положительная константа.

Такую модификацию МАО будем называть усеченным методом антиробастного оценивания. Необходимость выделения усечения P_1 из множества P может быть вызвана различными соображениями, следующими из целей моделирования конкретного объекта или процесса.

Заменим ограничения (5) следующими:

$$u_k + v_k - r_1 \leq 0, k \in P_1, \quad (8)$$

а целевую функцию (6) - на

$$r_1 + \rho \sum_{k \in P \backslash P_1} (u_k + v_k) \to \min. \quad (9)$$

Тогда усеченный МАО реализуется путем решения задачи ЛП (3), (4), (8), (9).

Заметим, что усеченный МАО является своего рода обобщением МНМ и МАО. Действительно, при P_1=P задача ЛП (3), (4), (8), (9) позволяет реализовать МАО, а при P_1=∅ - МНМ.

Рассмотрим простой численный пример. Пусть дана выборка:

$$X = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 7 & 5 \\ 9 & 8 \\ 2 & 7 \\ 4 & 1 \end{pmatrix}, \ y = \begin{pmatrix} 5 \\ 8 \\ 7 \\ 6 \\ 3 \end{pmatrix}.$$

Необходимо построить линейную двухфакторную регрессию без свободного члена

$$y_k = \alpha_1 x_{k1} + \alpha_2 x_{k2} + \varepsilon_k, k \in P = \{1,2, \dots ,5\} \quad (10)$$

с помощью МНМ, МАО и усеченного МАО, причем в последнем случае с множеством P_1={1,2,4,5}.

В результате получим следующие три варианта модели (10):

а). МНМ:

$$y_k = 0.575x_{k1} + 0.692x_{k2} + \varepsilon_k, \sum_{k \in P} |\varepsilon_k| = 6.807, r = 3.73.$$

б). МАО:

$$y_k = 0.777x_{k1} + 0.296x_{k2} + \varepsilon_k, \sum_{k \in P} |\varepsilon_k| = 8.592, r = 2.737.$$

в). Усеченный МАО:

$$y_k = 1.0x_{k1} + 0.5x_{k2} + \varepsilon_k, \sum_{k \in P} |\varepsilon_k| = 11, \ r_1 = 1.5.$$

Очевидно, что оценки параметров для них весьма различаются.

Заключение. В работе предложен способ постановки более общей задачи, чем та, которая соответствует методу антиробастного оценивания параметров линейной регрессионной модели, а именно: минимизации максимальной ошибки аппроксимации на группе наблюдений из полной выборки данных с одновременной минимизацией суммы абсолютных отклонений для оставшихся наблюдений. Показано, что вычислительная реализация этого способа сводится к решению задачи линейного программирования. Решен численный пример.

Список литературы

1. Mohanty S., Dash R. A flower pollination algorithm based Chebyshev polynomial neural network for net asset value prediction // Evolutionary Intelligence. 2023. V. 16. P. 115–131.
2. Al-Subaihi I., Watson G.A. Fitting Parametric Curves and Surfaces by $l\infty$ Distance Regression // BIT Numerical Mathematics. 2005. V. 45. P. 443–461.
3. Levit B. Some new perspectives in best approximation and interpolation of random data // Mathematical Methods of Statistics. 2013. V. 22. P. 165–192.
4. Zihan Li, Jianguo Yang, Kaiguo Fan, Yi Zhang. Integrated geometric and thermal error modeling and compensation for vertical machining centers // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. V. 76. P. 1139–1150.
5. Ontañón S. An overview of distance and similarity functions for structured data // Artificial Intelligence Review. 2020. V. 53. P. 5309–5351.
6. Surono S., Putri R.D.A. Combination of Minkowski and Chebyshev Distance Using Principal Component Analysis // International Journal of Fuzzy Systems. 2021. V. 23. P. 139–144.
7. Носков С.И. Метод антиробастного оценивания параметров линейной регрессии: число максимальных по модулю ошибок аппроксимации // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 1. С. 51-54.

8. Носков С.И. Метод смешанного оценивания параметров линейной регрессии: особенности применения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 1. С. 126-132.

9. Носков С.И. Построение производственной функции с постоянными пропорциями методом антиробастного оценивания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 383-387.

10. Носков С.И., Перфильева К.С. Эмпирический анализ некоторых свойств метода смешанного оценивания параметров линейного регрессионного уравнения // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 6 (108). С. 62-66.

11. Носков С.И. Метод максимальной согласованности в регрессионном анализе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10. С. 380-385.

12. Носков С.И. L-множество в многокритериальной задаче оценивания параметров регрессионных уравнений // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. 2004. № 1. С. 164-171.

Носков Сергей Иванович, д-р техн. наук, профессор, sergey.noskov.57@mail.ru, Россия, Иркутск, Иркутский государственный университет путей сообщения,

Кириллова Татьяна Климентьевн, канд. экон. наук, доцент, заведующий кафедрой, kirillova_tk@irgups.ru, Россия, Иркутск, Иркутский государственный университет путей сообщения,

Чекалова Александра Романовна, магистрант, chekalova49@gmail.com, Россия, Иркутск, Иркутский государственный университет путей сообщения

TRUNCATED METHOD OF ANTIROBASTE ESTIMATION IN REGRESSION ANALYSIS

S.I. Noskov, T.K. Kirillova, A.R. Chekalova

The work sets a more general task compared to the one that corresponds to the method of antirobust estimation of linear regression parameters, namely: minimizing the maximum approximation error on a group of observations selected from the full data sample, while simultaneously minimizing the sum of absolute deviations of the calculated values of the dependent variable from the actual specified for the remaining observations. It is proposed to call the corresponding method the truncated antirobust estimation method. It is shown that its computational implementation reduces to solving a linear programming problem. A numerical example has been solved.

Key words: linear regression model, Chebyshev distance, approximation errors, linear programming problem, methods of least moduli and antirobust parameter estimation.

Noskov Sergey Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, sergey.noskov.57@mail.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk State Railway University,

Kirillova Tatyana Klimentyevna, candidate of economic sciences, docent, head of the department, kirillova_tk@irgups.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk State Railway University,

Chekalova Aleksandra Romanovna, master's, chekalova49@gmail.com, Russia, Irkutsk, Irkutsk State Transport University

УДК 004
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-306-307

ЦИФРОВИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ «RATIONAL ROSE»

Т.Ю. Климова, И.Н. Хаймович

Целью статьи является описание метода создания новой информационной системы (ИС) документооборота конструкторской технологической подготовки производства (КПП) для цифрового завода в рамках предприятий занятых различными видами промышленности . В статье описаны понятия «цифровой завод», «цифровая фабрика» и описан алгоритм работы от создания диаграмм в «Rational Rose» с дальнейшей генерацией кода для C++.

Ключевые слова: умное производство, цифровизация, КТПП, цифровой завод, «RATIONAL ROSE», «SMART TEAM», кодирование.

Для современного, конкурентоспособного промышленного предприятия необходимым аспектом является эффективная технологическая подготовка производства [1].

Цифровизация КПП позволяет повысить производительность труда, сократить объем бумажной документации, сократить экономические затраты на производство и ускорить выпуск готовой продукции. Эффективность цифрового завода заключается в уменьшении ручного труда за счет увеличения автоматизации.

Цифровые заводы предлагают предприятиям новые возможности для оптимизации и улучшения качества своих производственных процессов.

Концептуальная модель цифрового завода может быть применена на любом производственном предприятии промышленной отрасли [2-4].

Разработка и внедрение совершенствованной информационной системы КПП позволит сократить время разработки новых изделий и принесет предприятию существенную экономическую выгоду. Новая система сможет использоваться на предприятии в качестве самостоятельного инструмента, а так же интегрироваться с другими продуктами, что позволит включить систему в единое решение для управления жизненным циклом изделия.

Использование информационной системы документооборота КПП позволит повысить качество и скорость принятия проектных решений у технологов при проектировании.

Новые возможности сделают систему более простой и удобной в использовании, а работу пользователей – более эффективной.

Концептуальная модель цифрового завода является иерархической (многоуровневой). Каждый последующий (верхний) уровень включает предыдущий (нижний), по при этом распространяет свое влияние на этапы жизненного цикла изделия и интегрированную цепь поставок.

Проведя литературный обзор, изучив статьи коллег [5-8] по проектированию информационной системы и основываясь на научных исследованиях в данной области других ученых[9,10] мною предложен следующий алгоритм.

Основная часть. Если мы хотим создать цифровой завод для нефтегазового предприятия ОАО «Волгобурмаш», то сначала необходимо построить концептуальную модель.

На рисунке 1 представлена концептуальная модель цифрового завода по изготовлению буровых долот.

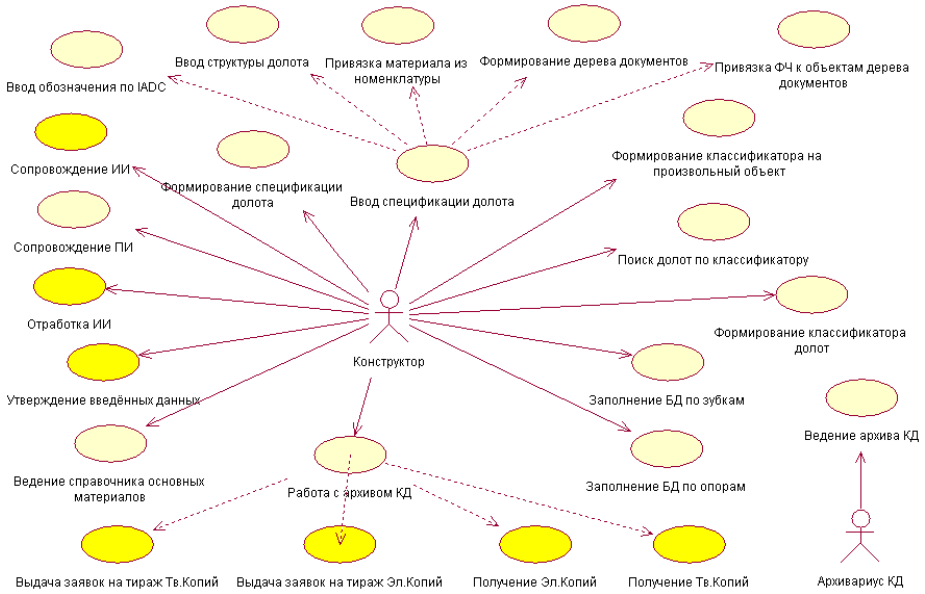


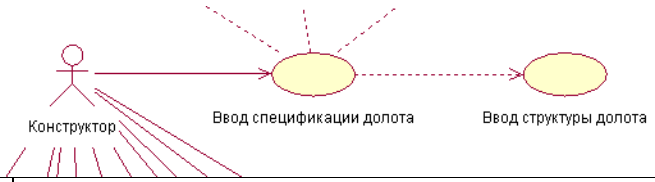
Рис. 1. Концептуальная модель предприятия ОАО «Волгобурмаш»

Общая функциональная модель бизнес - процессов конструкторской подготовки производства (КПП) строится на основе UML – диаграмм прецедентов использования с кратким описанием основных сценариев.

Конструктор по нефтегазовому оборудованию выполняет следующие функции: ввод спецификации долота, поиск долот по классификатору, формирование классификатора долот, заполнение базы данных по зубкам, заполнение базы данных по опорам, формирование спецификации долота, утверждение введенных данных, работа с архивом КД, ведение справочника основных материалов, сопровождение извещений об изменении и др.

Самое трудоемкое это добавить объекты (сборочные единицы изделия). В свою очередь ввод спецификации долота (см. рис. 1) содержит пять уровней вложений (ввод обозначения по IADS, ввод структуры долота, привязка материала из номенклатуры, формирование дерева документов и привязка ФЧ к объектам дерева документов). Одной из трудоемких частей в работе конструктора это заполнение баз данных по единицам и целого изделия. Сценарий ввода структуры изделия и получение иерархической спецификации объектов шарошечного долота представлен на рисунке 2.

Use Case Diagram:



Уровень:	Функция.
Основное действующее лицо:	Конструктор по нефтегазовому оборудованию.
Цель:	Получить иерархическую спецификацию объектов шарошечного долота.
Условие:	Конструктор создал объект базы данных ”Проект (изделие)”.

Рис. 2. Сценарий получения спецификации через диаграмму в программе «Rational Rose»

Опишем основной сценарий.

- Конструктор заполняет первый уровень вложенности объектов структуры долота. Первый уровень вложенности объектов структуры штыревого долота содержит пять объектов (сборка долота, присоединительная резьба, секция 1, секция 2, секция 3).

- Конструктор заполняет второй уровень вложенности объектов структуры долота.

Далее конструктор добавляет объекты первой секции (деталь, сборочная единица, материал). Добавляет входящие объекты «Гидромониторная лапа» и «Шарошка».

Следующий этапом конструктор добавляет объекты второй секции.

Копирует входящие объекты (деталь, сборочная единица, материал, «Гидромониторная лапа» и «Шарошка») из первой секции во вторую секцию.

Конструктор добавляет объекты третьей секции.

Объекты из первой секции копирует в третью секцию.

- Конструктор заполняет третий уровень вложенности объектов структуры долота. Он заполняет третий уровень вложенности объектов в секции 1. Добавляет необходимые входящие объекты к объекту «Гидромониторная лапа» и «Шарошка 1». Конструктор заполняет секцию 2 и секцию 3 копируя повторяющиеся элементы из объекта «Шарошка 1» в объект «Шарошка 2» и «Шарошка 3».

- Конструктор заполняет четвертый уровень вложенности объектов структуры долота в секции 1. Добавляет к элементам «КЭ-операция» (армирование) гидромониторной лапы необходимые объекты (Ряд зубков). Следующим шагом присоединяет к элементам «Ряд зубков» объекта «Шарошка 1» необходимых элементов (зубки) из базы данных. По такому же принципу заполняет секцию 2 и секцию 3.

- Конструктор заполняет пятый уровень вложенности объектов структуры долота. К объектам «Ряд зубков» гидромониторной лапы (в любой секции) присоединяет необходимые элементы «Зубок» из базы данных. Конструктор присоединяет опоры шарошки и лапы. UC завершается.

Иерархическая схема заполнения объектов показана на рисунке 3 в программе «SmarTeam».

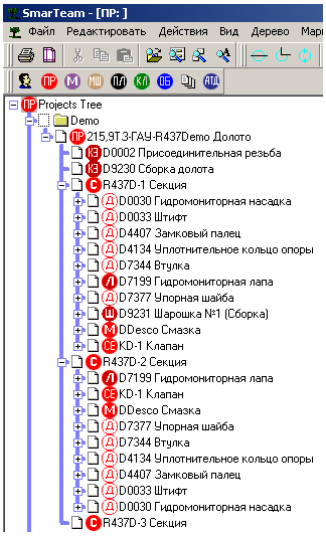


Рис. 3. Иерархическое дерево построения в программе «SmarTeam»

Алгоритм разработки совершенствования информационной системы документооборота конструкторской технологической подготовки производства (КТПП) показан на рисунке 3.

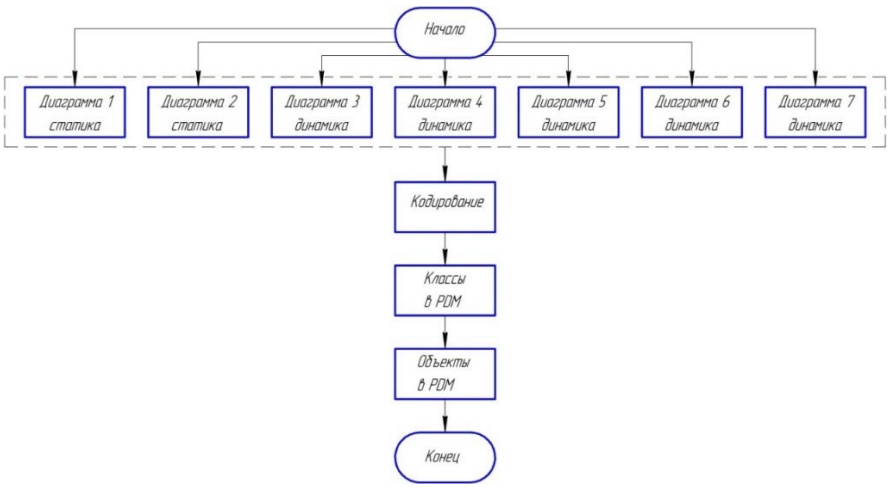


Рис. 3. Алгоритм совершенствования информационной системы документооборота КПП

Сначала создаем 2 статические диаграммы прецедентов и действий (описаны выше), далее создаем 5 динамических диаграмм (диаграмму классов, диаграмму последовательности действий и граничные классы, диаграмму взаимодействий, главную диаграмму компонентов и диаграмму внедрения). Теперь классы и объекты в PDM системе кодируем на языке C++. Заходим в Smart Team. Классы и объекты в PDM (в программе «SmarTeam»).

В результате получен код:

```
Function Specification (ApplHndl As Long, Sstr As String, FirstPar As Long, SecondPar As Long, ThirdPar As Long) As Integer
        Dim ret As Integer
        Dim MyObj As Object
  Dim s As String

  s =  MainAccordDll

            ret=InitClass(ApplHndl, Sstr, FirstPar, SecondPar, ThirdPar, MyObj, "ASmartLib.Reporting")
            MyObj.SpVBM
            Set MyObj=Nothing
  End Function
```

В целом, основой виртуального предприятия является сочетание информационных технологий, удаленного доступа к данным и работе команды экспертов, способных эффективно сотрудничать и грамотно работать в виртуальной среде.

Вывод. Для автоматизации конструкторской технологической подготовки производства машиностроительных предприятий необходимо использовать следующий алгоритм информационных систем: проектируем концептуальную модель информационной системы в SADT – диаграммах (диаграмму прецедентов, диаграмму действий, диаграмму классов, диаграмму последовательности действий и граничные классы, диаграмму взаимодействий, главную диаграмму компонентов и диаграмму внедрения), выделяем классы и объекты будущей системы, затем кодируем разработанные классы и объекты в виде программных модулей в конкретной PDM системе, проводим тестирование этих модулей в конкретной PDM системе, обучение сотрудников предприятия и внедрение в рабочий процесс производства.

Список источников

1. Khaimovich I.N. Computer aided design of blank forging production facilities for aircraft engine compressor blades // Russian Aeronautics. 2014. № 57(2). P. 169-174.

2. Гречников, Ф.В. Хаймович, И.Н. Разработка информационных систем управления конструкторско–технологической подготовкой производства как интегрированной базы информационных и функциональных структур [Текст] / Ф.В. Гречников, И.Н. Хаймович // Кузнечно-штамповочное производство. М., 2008. №3. С.34-41.

3. Хаймович, И. Н. Методология организации согласованных механизмов управления процессом конструкторско-технологической подготовки производства на основе информационно-технологических моделей: специальность 05.02.22 «Организация производства (машиностроение)» Автореферат на соискание доктора технических наук / Хаймович, И. Н. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Самара, 2009. 35 с.

4. Ковалькова Е. А., Хаймович И. Н. Автоматизация проектирования документоориентированных процессов конструкторско-технологической подготовки производства [Текст] // Вестник Международного института рынка. 2016. № 1. С. 199-205.

5. Хаймович, И.Н. Разработка производственной среды при внедрении ИС КТПП в условиях ограничения по ресурсам [Текст] / И.Н. Хаймович: монография. Самара: Изд-во Самар. науч.центра РАН, 2008. 164 С.

6 Хаймович, И.Н. Применение методологии SADT при моделировании бизнес-процессов технологической подготовки производства машиностроительного предприятия [Текст] / И.Н.Хаймович // Известия Самар. науч.центра РАН. Самара, 2008. №1. С. 21-25.

7. Chumak V. G., Ramzaev V .M., Khaimovich I. N. Challenges of data access in economic research based on big data technology // CEUR Workshop Proceedings Proceedings of International Conference Information Technology and Nanotechnology (ITNT 2015). – 2015. – С. 327-337.

8. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Интегрированная система управления дискретным машиностроительным производством на платформе 1с: УПП [Текст] // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–12. – С. 2558–2562.

9. Часовских, В. П. Создание эффективных цифровых фабрик посредством формирования цепочек технологий [Текст] / В. П. Часовских, М. П. Воронов, Е. В. Кох // Фундаментальные исследования, – 2022. – №10(2). – С. 243 – 248.

10. Рамзаев В. М., Хаймович И. Н., Чумак П. В. Управление инвестиционными проектами при проведении энергомодернизаций предприятий в регионе [Текст] // Экономические науки. – 2013. – № 101. – С. 109-113.

Климова Татьяна Юрьевна, аспирант, klimova-7979@mail.ru., Россия, Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет),

Хаймович Ирина Николаевна, д-р техн. наук, доцент, kovalek68@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

DIGITALIZATION OF DESIGN TECHNOLOGY PREPARATION OF PRODUCTION ON THE BASIS OF "RATIONAL ROSE"

T.Yu. Klimova, I.N. Haymovich

The purpose of article is the description of a method of creation of the new information system (IS) of document flow of design technology preparation of production (check point) for digital plant within the enterprises occupied with different types of the industry. In article the concepts "digital plant", "digital factory" are described and the algorithm of work from creation of charts in "Rational Rose" with further generation of a code for With ++ is described.

Key words: smart production, digitalization, KTPP, digital plant, "RATIONAL ROSE", "SMART TEAM", coding.

Klimova Tatiana Yrjevna, postgraduate, klimova-7979@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University),

Khaimovich Irina Nikolaevna, doctor of technical sciences, docent, kovalek68@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

УДК 004:9
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-310-311

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА

К.Ю. Черкасов, И.Н. Хаймович

Описаны вопросы внедрения информационных систем конструкторско-технологической подготовки производства для улучшения показателей контроля над производственными процессами. Рассмотрены возможности применения стандарта, описывающего жизненный цикл программного обеспечения в рамках модели информационной системы, разделённой на несколько этапов.

Ключевые слова: информационная система, подготовка производства, жизненный цикл программного обеспечения.

Информационные системы конструкторско-технологической подготовки производства (ИС КТПП) имеют важное значение для современных предприятий в машиностроительной отрасли и выполняют ряд ключевых функций. ИС КТПП позволяют автоматизировать и оптимизировать множество бизнес-процессов в производстве, включая проектирование изделий, разработку технологических карт, управление ресурсами, планирование производства. Оптимизация производственного процесса непосредственным образов влияет на сокращение времени, необходимого для разработки и выпуска продукции. Это дает конкурентное преимущество на рынке. Внедрение ИС КТПП позволяет более эффективно управлять ресурсами предприятия, включая рабочую силу, оборудование и сырье. Это способствует оптимизации затрат и ресурсов [1, 2, 3].

Развитие информационных технологий существенно расширило способы реализации ИС КТПП. Выбор конкретного способа зависит как от требований со стороны заказчика так и от инфраструктурных ограничений при внедрении програмного продукта на производство. Как правило требования к продукту меняются в процессе разработки. Границы возможных изменений требований согласовываются с заказчиком и являются важным фактором в поиске компромисса между скоростью разработки продукта и возможностью внесения изменений в готовую систему. Проектирование ИС - это процесс принятия конструкторских и технлогических решений, с целью релизовать проект согласно требованиям заказчика в рамках предоставляемой инфраструктуры с учетом возможных будущих изменений. В условиях быстро меняющихся технологий гибкость модели ИС КТПП является важным фактором при проектировании програмного продукта. Важной характеристикой также является простота в освоении и применении модели ИС. Согласованность описания технических объектов с возможностями восприятия человека в конечном итоге приводит к повышению эффективности и производительности труда на производстве. При жёстких сроках и больших объёмах часть выполняемых проектных работ может делегироваться сторонним исполнителям. В этом случае контролирующая головная организация осуществляет координацию деятельности всех сторонних компаний. Комплекс задач управления регламентируется формальным набором требований, что достигается благодаря ясной декомозиции и разделению системы на функциональные части. Регламентированная последовательность действий дает возможность выстроить сложные компоненты системы в строгую иерархию, а средства проектирования позволяют охватывать все этапы жизненного цикла продукта. С ростом масштаба и сложности програмного продукта структурированность внедрённой ИС КТПП начинает играть важную роль тем самым определяя стоимость дальнейшего внедрения и эксплуатации продукта на предприятии.

Составляющие производственной среды - компоненты, которые представляют собой как готовые методы, так и различные методологии. Функционально компоненты представляют собой элементы, которые направлены на управление и на реализацию внедрения ИС в подготовке производства. Такими компонентами являются:

1) структурные методы, такие как диаграммы DFD, ER-диаграммы, схемы состояний и переходов;

2) методология планирования бизнес-систем BSP для анализа, определения и проектирования информационной архитектуры организаций;

3) CASE-средства верхнего и нижнего уровня, интегрированные CASE-средства;

4) методологии структурного анализа и проектирования, интегрирующие процессы моделирования SADT;

5) водопадная, спиралевидная и итерационная модели внедрения ИС;

6) доменная экспертиза в отрасли.

Цикличный характер внедрения информационных систем в КТПП обусловлен необходимостью проведения нескольких итераций цикла в целях поиска оптимальной модели с учетом заданных ресурсов. В начале каждого цикла происходит определение динамической модели для объекта со список определённых сущностей Φ_1, Φ_2, …, Φ_N. Подбор этих параметров осуществляется в зависимости от величины необходимого минимального порога использования с применением критерия полноты существующей модели ИС КТПП. В результате адаптации динамической модели производится поиск значения N опираясь на доступные ресурсы. Итерация цикла происходит до момента равенства посчитанного количества ресурсов на текущем этапе с ресурсами доступными заказчику. Таким образом если ресурсы заказника соответствуют найденному значению, то цикл останавливается. В этом случае в зависимости от выбранного жизненного цикла программного обеспечения (ЖЦ ПО) происходит формирование технического задания (ТЗ) [4]. Далее в зависимости от согласованного ЖЦ ПО осуществляем переход к следующему этапу и выстраиваем план выполнения следующего шага. [5]

Предлагаемый метод построения модели ИС КТПП подразумевает разбиение всей схемы на несколько этапов. Глубина декомпозиции определяется набором требований к разработке ИС КТПП. В ситуации ограниченности по ресурсам предлагаемый метод выделяет три этапа построения модели.

На первом этапе осуществляется работа с данными организации включая различные стандарты и руководства. На этом этапе происходит формализация данных и адаптация их с учётом требований к разработке ИС КТПП. Первый этап модели построения ИС КТПП схематично представлен на рис. 1.

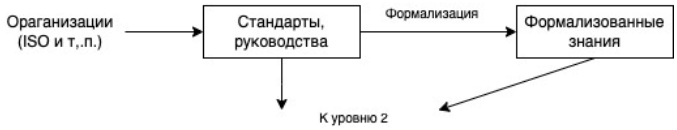


Рис. 1. Первый этап модели построения ИС КТПП

Жизненный цикл программного обеспечения (ЖЦ ПО) представляет собой последовательность этапов и процессов, которые программное обеспечение проходит с момента его создания до вывода из эксплуатации. На каждом этапе вводятся данные, которые впоследствии преобразуются в результаты. В различные моменты ЖЦ ПО используются как документация, так и программный код в качестве входных и выходных данных. Разбиение каждого этапа на составляющие элементы позволяет выделить основные компоненты ЖЦ ПО, которые обрабатывают часть входных данных и генерируют соответствующие результаты для данного этапа.

На каждом этапе ЖЦ ПО используются ресурсы. Помимо методов и инструментов к ресурсам можно отнести и человеческий потенциал. Стандартом ISO/IEC 12207 [6] рекомендуется разделение процессов ЖЦ ПО на категории:

1) управленческие процессы, которые охватывают деятельность по организации и координации функционирования команды, участвующей в разработке;

2) организационные процессы, которые нацелены на управление процессом разработки, тестирования, внедрения и поддержки программного продукта;

3) технические процессы, связанные со всеми техническими аспектами построения ПО на каждом этапе построения программного продукта.

Процессы управления осуществляются путем координации ключевых участников, включенных в ЖЦ ПО. Под ключевыми участниками понимаются организации, которые являются владельцами продукта или непосредственно ведут разработку, эксплуатацию, тестирование или сопровождение ПО. Ключевыми участниками являются как представители заказчика, так и исполнители, а именно заказчик ПО, аналитик, разработчик, менеджер проекта, инженер тестирования, инженер сопровождения и другие специалисты.

Заказчик является инициатором разработки ПО, он выполняет ряд действий в процессе построения заказа. Перед тем как осуществлять формирование заявки на выполнение работы происходит определение потребностей в системе и формирование целей конкретного программного продукта. Далее осуществляется выбор исполнителя и ведение проекта. По результатам работы исполнителя заказчик осуществляет приемку программного обеспечения. В случае необходимости, заказчик может заключить договор с посредником, который будет последовательно выполнять соответствующие задачи согласно техническому заданию.

Процесс поставки согласно международному стандарту ISO/IEC 12207 включает в себя серию операций и мероприятий, которые осуществляются поставщиком. Стартом этого процесса считается либо начало работы над ответным предложением на запрос о выполнении работ или с момента подписания контракта для поставки ПО и установления партнерских отношений с заказчиком. Следующим шагом является согласование ресурсной базы заказчика и необходимых процедур для успешного достижения целей продукта. Этот шаг включает в себя разработку и реализацию планов проекта и достижение поставки услуги по разработки ПО посредством передачи готовой системы заказчику.

Следующим шагом, согласно стандарту, является процесс разработки ПО. Он включает в себя последовательность действий и задач, которые выполняются разработчиками. Входными данными для этого процесса являются требования заказчика. В рамках данного процесса по результату анализа этих требований выстраивается архитектура проекта. Учитывая архитектуру построения ПО, осуществляется декомпозиция требований для каждого моду-

ля. Далее осуществляется непосредственно написание программного кода каждого модуля выбранной архитекторы приложения. Сборка, тестирование приложения, а также ввод в эксплуатацию ПО, согласно стандарту, тоже являются частью процесса разработки. В соответствии с выбранной архитектурой разработчик сам определяет необходимую инфраструктуру проекта согласно процедуре создания инфраструктуры, согласованной с заказчиком.

На втором этапе с использованием средств поддержки инженерии процесса осуществляется формирование модели процесса организации. Второй этап модели ИС КТПП схематично представлен на рис. 2. Важным аспектом при построении модели ИС является анализ информации о предыдущих проектах как правило представленный в виде базы данных (БД). Эта информация позволяет сформировать метод спецификации плана проекта, который будет использоваться на третьем этапе.

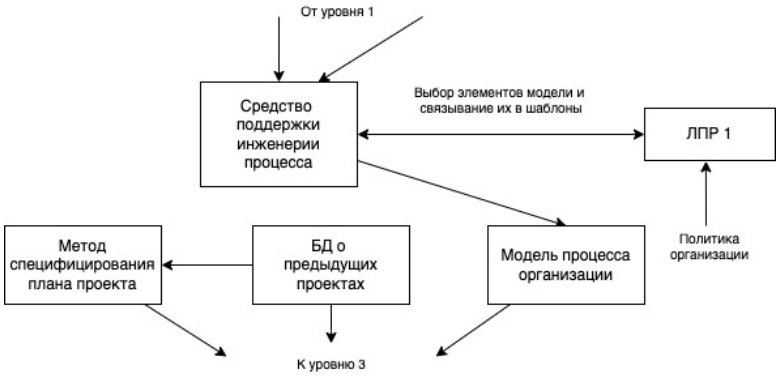


Рис. 2. Второй этап модели построения ИС КТПП

На третьем этапе осуществляется фильтрация исторических данных. Происходит адаптация информации со второго этапа с использованием средств построения статической модели плана проекта, поддержки определения параметров в контексте и различных средств оценивания, анализа и графического представления полученных данных [7]. Третий этап представлен на рис. 3.

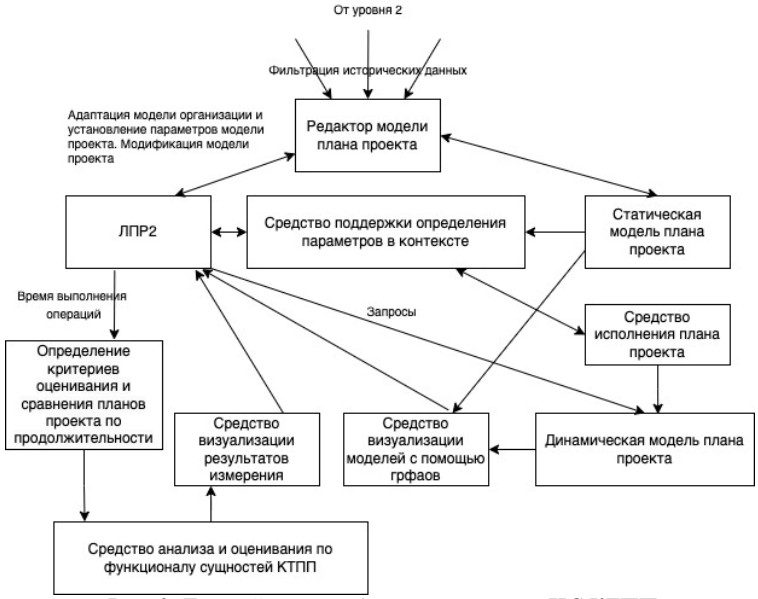


Рис. 3. Третий этап модели построения ИС КТПП

Построенная предложенным метод ИС согласно стандарту ISO/IEC 12207 применятся в том числе и в таких процессах жизненного цикла ПО как эксплуатация и сопровождение. Процесс оперативной эксплуатации включает в себя ряд операций и задач, выполняемых оператором ПО. Этот процесс включает в себя как непосредственно управление работой программного продукта согласно требованиям заказчика, так и предоставление поддержки пользователям во время использования. В контексте машиностроительного предприятия важную роль играет система, в которой будет применятся построенное ПО для КТПП поскольку эксплуатация программного продукта тесно связана с функционированием предприятия. По этой причине задачи и работы на этом этапе сильно зависят от конкретной системы и интеграции ИС КТПП на предприятии машиностроительного профиля. Оператор осуществляет руководство процессом эксплуатации на уровне конкретного проекта в соответствии с установленными процедурами управления. Инфраструктурные задачи по интеграции сторонних ресурсов, их адаптация под конкретные условия проекта и управление всеми процессами эксплуатации ИС КТПП на уровне организации относится к процессу эксплуатации и соответственно соотносится с процессом создания инфраструктуры, процессом адаптации и процессом усовершенствования. В случае если заказчик в качестве исполнителя поставщика услуги выбрал оператора, то оператор выступает в качестве поставщика ПО.

В рамках ЖЦ ПО следующим шагом является процесс сопровождения. Он включает в себя различные задач, которые выполняются сотрудниками, ответственными за сопровождение. Необходимость в этом процессе может возникнуть при появлении задачи внесения изменений в ПО и документацию. Также причиной реализации данного этапа могут быть возникшие проблемы или потребность в изменениях параметров ПО под изменившиеся условия. В результате работы на этом этапе все необходимые изменения и доработки не должны влиять на целостность продукта. Это накладывает ряд ограничений на команду сопровождения так как ограничивает их действия рамками текущей функциональности и не позволяет делать фундаментальные доработки. Таким образом сложность этого процесса напрямую зависит от объёма правок, которые требуется внести в ПО и от того на сколько эти изменения могут быть внедрены в текущую архитектуру приложения без существенных изменений. Условие переносимости заранее согласовываются с заказчиком. Оно влияет на объём доработок при необходимости перенести ПО на другое предприятие машиностроительного профиля. Процедура вывода ПО из эксплуатации и процедура переноса также относятся к процессу сопровождения ЖЦ ПО. На рис. 4 представлена диаграмма Ганта части основных процессов стандарта ISO/IEC 12207.

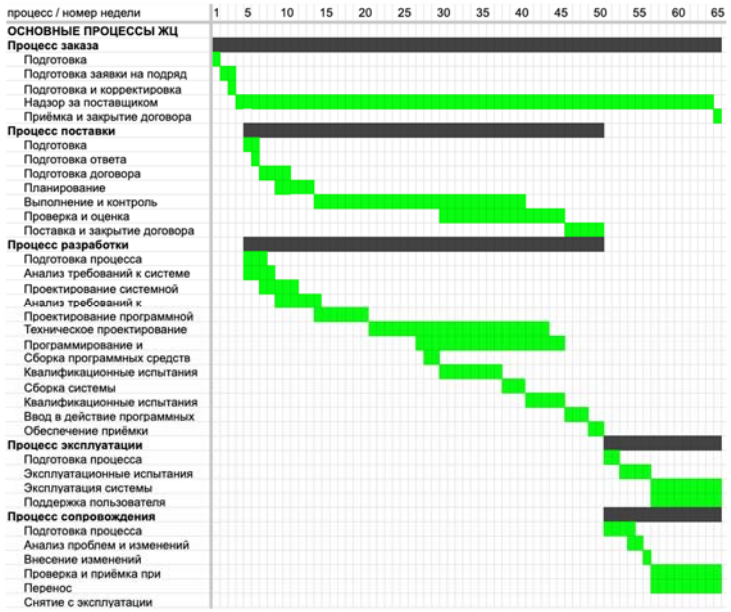


Рис. 4. Часть основных процессов стандарта ISO/IEC 12207

Поскольку в процесс сопровождения могут быть включены различные работы из других этапов ЖЦ ПО, то в нём могут применяться другие процессы, определённые в соответствии со стандартом. В таком случае в команде персонала сопровождения могут быть разработчики, аналитики и инженеры тестирования. Эти роли в процессе сопровождения имеют свою специфику. Ограниченность доработок и необходимость соблюдать целостность продукта накладывают дополнительные требования к проведению полноценного тестирования с целью недопустимости регрессии ПО. Команда сопровождения координирует весь процесс сопровождения на уровне конкретного проекта, соблюдая установленные процедуры управления. В случае, если сотрудники сопровождения выступают в качестве поставщиков услуг сопровождения, они реализуют процесс поставки услуги. Процесс сопровождения продолжается до момента прекращения эксплуатации ПО.

Вывод. Эти модели и методы можно использовать для поэтапной разработки ИС в КТПП, но на сегодняшний момент появились новые возможности для автоматизации разработки ИС на машиностроительном предприятии, можно использовать при внедрении онтологии и базы знаний, а также формировать типологизацию процессов производства с использованием квантовых технологий и технологий BIG DATA [8, 9, 10].

Список литературы

1. Батищев В.И. Концепция информационной среды в организации производства на предприятии с применением оптимизации маршрутов обработки деталей [Текст] / В. И. Батищев, И. Н. Хаймович, В. И. Марков, А. Н. Макашов // Вестник Самарского муниципального института управления. - 2018. - № 3. - С. 77-85.

2. Кокарева В.В. Имитационное моделирование производственных процессов в рамках концепции «бережливого производства» / В. В. Кокарева, В. Г. Смелов, И. Л. Шитарев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). - 2012. № 3-3 (34). С. 131-136.

3. Хаймович И.Н., Хаймович А.И. Проектирование и реализация системы автоматизированного проектирования штамповки компрессорных лопаток из титановых сплавов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2015. № 2. С. 37-43.

4. Меламед А.Я. Аппаратно-программный комплекс для решений задач автоматизации CRM [Текст] / А. Я. Меламед // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тезисы докладов/ М., 2003. С. 53.

5. Хаймович И.Н. Разработка производственной среды при внедрении информационных систем конструкторско-технологической подготовки производства в условиях ограничения по ресурсам [Текст]/ И.Н. Хаймович: монография. Самара: Изд-во СНЦ, 2008. 164 с.

6. ISO/IEC 12207:1995 Information technology — Software life cycle processes [Электронный ресурс] URL: https://www.iso.org/standard/21208.html (дата обращения: 03.11.2023).

7. Хаймович И.Н. Рационализация организации производства машиностроительного предприятия на основе реинжиниринга / И.Н. Хаймович, А.И. Хаймович // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева. 2006. № 3 (11). С. 53-57.

8. Chang W., Fox G., NIST N. NIST Big Data Interoperability Framework: Volume 3, Big Data Use Cases and General Requirements [Version 2], Special Publication (NIST SP), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2018. DOI: 10.6028/NIST.SP.1500-3r1.

9. Geoffrey Fox. Data Science Curriculum: Indiana University Online Class: Big Data Open Source Software and Projects - 2015 [Электронный ресурс] URL: http://bigdataopensourceprojects.soic.indiana.edu (дата обращения: 03.11.2023).

10. High Performance High Functionality Big Data Software Stack, Big Data and Extreme-scale Computing (BDEC) - 2014 [Электронный ресурс] URL: https://www.odbms.org/2014/04/high-performance-high-functionality-big-data-software-stack (дата обращения: 03.10.2023).

Черкасов Константин Юрьевич, аспирант, koscher91@gmail.com, Россия, Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,

Хаймович Ирина Николаевна, д-р техн. наук, проф., kovalek68@mail.ru, Россия, Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,

DEVELOPMENT OF INFORMATION SYSTEMS IN THE DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION

K.Y. Cherkasov, I.N. Khaimovich

The issues of implementation of information systems of design and technological preparation of production to improve the indicators of control over production processes are described. The possibilities of applying a standard describing the software lifecycle in an information system model divided into several stages are considered.

Key words: information system, production preparation, software lifecycle.

Cherkasov Konstantin Yurievich, postgraduate, koscher91@gmail.com, Russia, Samara, Samara National Research University,

Khaimovich Irina Nikolaevna, doctor of technical sciences, professor, kovalek68@mail.ru , Russia, Samara, Samara National Research University

УДК 62-932.4
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-314-315

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ЧЕЛОВЕКА

Б.А. Данилюк, А.В. Смирнов, М.С. Токарев

В статье рассматриваются достоинства и недостатки алгоритмов взаимодействия робототехнических комплексов и человека, а также формирование общих и частных закономерностей их развития.

Ключевые слова: робот, робототехнический комплекс, алгоритм взаимодействия, управление.

Одной из активно развивающихся областей современной прикладной науки является робототехника. Динамичное развитие робототехники в настоящее время характеризуется лавинообразным созданием робототехнических комплексов (РТК) различного назначения, позволяющих реализовать большинство функций, выполняемых человеком.

При этом РТК являются принципиально новым техническим средством автоматизации процессов функционирования сложных организационно-технических систем, а условия их использования позволяют исключить участие человека как во вспомогательных, так и в основных технологических операциях.

Алгоритмы взаимодействия РТК и человека в настоящее время приобрели особое значение для управления структурами автоматизированных и робототехнических систем [1].

В соответствии с [2] и [3] под РТК понимается комплекс, состоящий из одного или нескольких роботов, их рабочих органов и любых механизмов, оборудования, приборов или датчиков, обеспечивающих выполнение роботом функционального назначения (задания).

Существующая классификация РТК по уровню автономности решения задач может быть представлена в следующем виде [4]:

- РТК первого поколения: устройства с программным и (или) дистанционным управлением, способные функционировать только в специально организованной среде; производительность процессоров данных РТК составляет от 3000 до 1 млн. команд в секунду (MIPS). Основное назначение таких РТК – получение и выполнения только одной целевой задачи, которая программируется заранее.

- РТК второго поколения: устройства с программным и (или) дистанционным управлением, имеющие набор датчиков, позволяющие им выполнять задачи в заранее неизвестных условиях, или приспосабливаться к изменениям текущей обстановки. Данные РТК позволяют реализовать частично адаптивное поведение, производительность процессоров данных РТК составляет от 1 млн до 10 млн MIPS.

- РТК третьего поколения: интеллектуальные устройства, имеющие систему управления с элементами искусственного интеллекта, основу которых составляют процессоры с производительностью от 10 млн. MIPS. Особенность таких комплексов заключается в том, что для выполнения целевых задач требуется обучение РТК на наборе статистических данных;

- РТК четвертого поколения являются дальнейшим развитием РТК третьего поколения и представляют собой устройства, способные принимать самостоятельные решения.

Представленная классификация позволяет человеку выбирать наиболее подходящий тип РТК для конкретной целевой задачи. Однако, различный уровень их автоматизации и различия в процессах функционирования РТК приводят к появлению ограничений на обмен информацией в процессе взаимодействия РТК и человека.

Накладываемые ограничения отражаются в свойствах, характеризующие процесс взаимодействия РТК и человека, основными из которых являются:

- *целеустремленность* – отдание максимального приоритета достижению поставленной цели функционирования РТК с возможностью изменения задач и средств их реализации;

- *самоорганизованность* – способность РТК к уменьшению неопределенности после вывода из устойчивого, равновесного состояния под действием различного рода дестабилизирующих факторов.

- *адаптивность* - приспособление РТК к изменяющимся условиям работы, изменение режима его функционирования, структуры и связей между элементами в соответствии с новыми условиями.

Использование данных свойств в процессе взаимодействия РТК и человека позволяет осуществить правильное разделение функций на различных этапах выполнения целевой задачи и закрепление отдельных задач как за РТК, так и за человеком.

Анализ существующих алгоритмов взаимодействия РТК и человека [5], позволил разделить их на «алгоритмы программируемого взаимодействия» и «алгоритмы взаимодействия в реальном масштабе времени».

Суть алгоритмов программируемого взаимодействия заключается в том, что человек задает стартовую циклограмму функционирования РТК, после активации которой происходит отработка заложенной в него программы. После завершения программы - РТК завершает работу.

Особенностью данного вида является то, что процесс взаимодействия РТК и человека, вне зависимости от его продолжительности, завершается с началом выполнения РТК целевой задачи, возможности дальнейшей её корректировки и получения обратной информации не существует.

Структурная схема алгоритма программируемого взаимодействия РТК и человека представлена на рисунке 1.

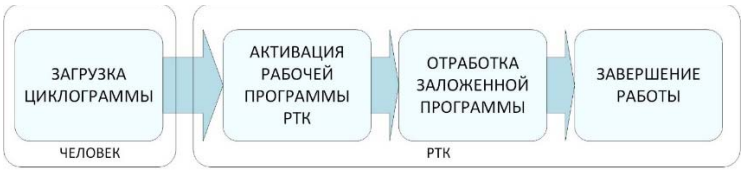


Рис. 1. Структурная схема алгоритма программируемого взаимодействия РТК и человека

Данный алгоритм реализован в РТК, в которых все действия жёстко фиксированы и регулярно повторяются, изменение циклограммы работы РТК под любыми внешними воздействиями не предусматривается.

Достоинства данного алгоритма взаимодействия заключаются в том, что после ввода управляющей программы человеку нет необходимости дальнейшего управления РТК, также отсутствует возможность взлома системы управления РТК в процессе выполнения целевой задачи.

Недостатки заключаются в том, что отсутствует возможность внесения коррекции и получения данных с РТК, в том числе о выполнении или невыполнении целевой задачи, невозможность учета всех факторов, оказывающих воздействие на выполнение поставленной задачи.

Дальнейшее развитие алгоритмов взаимодействия РТК и человека привело к возникновению алгоритма программируемого корректируемого взаимодействия, представленного на рисунке 2.

Наиболее существенное отличие данного вида взаимодействия от вида взаимодействия программируемого взаимодействия заключается в наличии обратной связи, что в свою очередь открывает возможность к адаптивному управлению РТК.

Рис. 2. Структурная схема алгоритма программируемого корректируемого взаимодействия

Человек закладывает стартовую циклограмму в РТК не подразумевая её начальную корректировку, но используя возможность частичной корректировки результатов функционирования по обратной связи.

Данный алгоритм позволяет РТК при выполнении своих функций оперативно изменять в заданных пределах свое состояние, стремясь минимизировать влияние внешней обстановки на результат целевого функционирования.

Достоинства: после ввода управляющей программы человек может скорректировать работу РТК.

Недостатки: при неавторизованном доступе существует возможность несанкционированной корректировки работы РТК, ограниченное количество подаваемых команд, отсутствует возможность получения данных с РТК, в том числе о выполнении или невыполнении целевой задачи.

Наиболее перспективным алгоритмом взаимодействия РТК и человека является алгоритм взаимодействия в режиме реального времени. Типовая схема данного алгоритма представлена на рисунке 3.

В настоящие время большинство РТК используют именно эту схему.

Рис. 3. Типовая схема алгоритма взаимодействия РТК человека в режиме реального времени

Несмотря на достаточно высокую эффективность, данная система взаимодействия требует совершенствования, поскольку при проведении работ в реальных условиях в ряде случаев значительное влияние на управляемый РТК оказывает внешняя среда, воздействие которой необходимо учитывать в реальном масштабе времени.

Дальнейшим развитием алгоритмов взаимодействия РТК и человека являются алгоритмы взаимодействия в реальном масштабе времени с адаптацией. Комплексы использующие алгоритмы взаимодействия в реальном масштабе времени с адаптацией требуют оснащения логическими устройствами, позволяющими производить статистический анализ текущей обстановки и прогнозирование на заданный период, пример подобной системы представлен на рисунке 4.

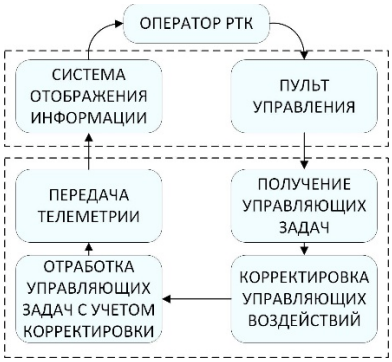


Рис. 4. Типовая схема алгоритма взаимодействия РТК человека в режиме реального времени с адаптацией

Достоинства: после ввода управляющей программы человек может скорректировать работу РТК, есть данные о функционировании РТК, что позволяет планировать дальнейшее его применение и своевременно корректировать. Кроме этого, человек имеет возможность практически неограниченно подавать команды в РТК и постоянно получать обратную информацию.

Недостатки: существует возможность несанкционированной коррекции работы РТК, а при определенных условиях и обнаружение человека – оператора, управляющего РТК.

Перспективы развития алгоритмов взаимодействия. Развитие алгоритмов взаимодействия РТК и человека лежит в области создания гибких, конфигурируемых под конкретную задачу технических устройств, обладающих интеллектуальными возможностями, способных приспосабливаться и работать в неструктурированной среде, эффективно взаимодействовать между собой и с человеком.

Соответствующие этим требованиям пути развития алгоритмов взаимодействия РТК и человека лежат на следующих направлениях:

- повышение способность РТК к восприятию текущей обстановки;
- повышение способности РТК к адаптации (прежде всего, за счёт сенсорного обеспечения),
- представление РТК возможности автоматической реконфигурации оборудования;
- наделение РТК способностью автономно принимать решения;
- совершенствование интерфейса взаимодействия РТК и человека (использование дополненной или виртуальной реальности);

Следует отметить, что при определении перспективных алгоритмов управления РТК, они скорей всего будут представлять совокупность программируемого и адаптивного управления, при которой человек РТК ставит цели вместо задач и имеет возможность их коррекции, при этом выбор методов их решения остаются за РТК.

Заключение. Современные тенденции развития информационных технологий все больше заставляют внедрять различные РТК во все сферы жизнедеятельности человека. С учетом множества существующих алгоритмов взаимодействия РТК и человека, число которых стремится превысить количество самих РТК в данной статье был выделен ряд основных обобщающих алгоритмов, рассмотрены их особенности, достоинства и недостатки.

Проведенный анализ показывает, что ведущие технологически развитые страны, разрабатывают РТК, способные с высокой степенью автономности функционировать без участия человека. Однако, анализ перспективных проектов демонстрирует, что в недалеком будущем РТК самого разного назначения уверено займут свое место в наземной, морской и даже в космической сфере.

При этом уже сейчас можно констатировать тот факт, что широкое применение РТК приведет к коренному пересмотру применяемых технологий, открывая новые возможности их применения.

Список литературы

1. Каляев И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 280 с.
2. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : разработан Федеральным государственным автономным научным учреждением «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИ РТК). Москва: Стандартинформ, 2019. 28 с.
3. ГОСТ Р 60.0.0.2-2016. Роботы и робототехнические устройства. Классификация : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : дата введения 2018-01-01. Москва: Стандартинформ, 2018. 15 с.
4. Макаренко С.И. Робототехнические комплексы военного назначения - современное состояние и перспективы развития. // Системы управления, связи и безопасности №2. 2016 sccs.intelgr.com №2. 2016. С. 73-132.
5. Урванов Г.А. Система взаимодействия с человеком, как агентом мобильного робототехнического комплекса / В. В. Даньшин, А. А. Дюмин, Е. В. Чепин; Программные системы и вычислительные методы, 2015. 120 с.

Данилюк Богдан Александрович, адъюнкт, 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,

Токарев Максим Сергеевич, канд. воен. наук, старший преподаватель, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR THE INTERACTION OF ROBOTIC COMPLEXES AND HUMANS

B.A.Danilyuk, A.V. Smirnov, M.S.Tokarev

The article discusses the advantages and disadvantages of algorithms for the interaction of robotic complexes and humans, as well as the formation of general and particular patterns of their development.
Key words: robot, robotic complex, interaction algorithm, control.

Danilyuk Bogdan Aleksandrovich, adjunct, vka@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Smirnov Alexey Vadimovich, candidate of militaring sciences, lecturer, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Tokarev Maxim Sergeevich, candidate of militaring sciences, senior lecturer, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 621.396
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-317-318

ПРОЦЕДУРЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИТУАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

Н.П. Удальцов, П.А. Агеев, Е.В. Михейкина

В статье рассматриваются основные процедуры применения ситуационных тренажеров на основе моделирования деятельности должностных лиц органов управления с целью совершенствования способов и методов работы и повышения качества управления.
Ключевые слова: должностное лицо, орган управления, организация, ситуационное моделирование, обстановка, сценарий, специальное программное обеспечение.

Подготовка должностных лиц органов управления различных уровней кропотливый и сложный процесс. Для этих целей широко используются различные технические средства обучения, в том числе и компьютерные тренажеры [1].

Специфика деятельности должностных лиц дежурной смены органа управления предполагает необходимость обучения их основам ситуационного анализа и управления. Для данной цели целесообразно использовать ситуационные тренажеры. Базовый вариант ситуационного тренажера показан на рис. 1.

Состав ситуационного тренажера:
автоматизированные рабочие места обучаемых (АРМ ДЛ);
модуль ситуационного моделирования функционирования органа управления;
база данных и генератор ситуаций;
база данных и генератор событий;
модуль оценки действий должностных лиц дежурной смены;
модуль управления ситуационным тренажером.

Количество *автоматизированных рабочих мест* обучаемых может варьироваться от одного до максимально необходимого количества, соответствующего численности должностных лиц (ДЛ – обучаемых) дежурной смены органа управления (ОУ). В качестве рабочих мест должностных лиц (АРМ ДЛ) могут использоваться штатные АРМ органа управления

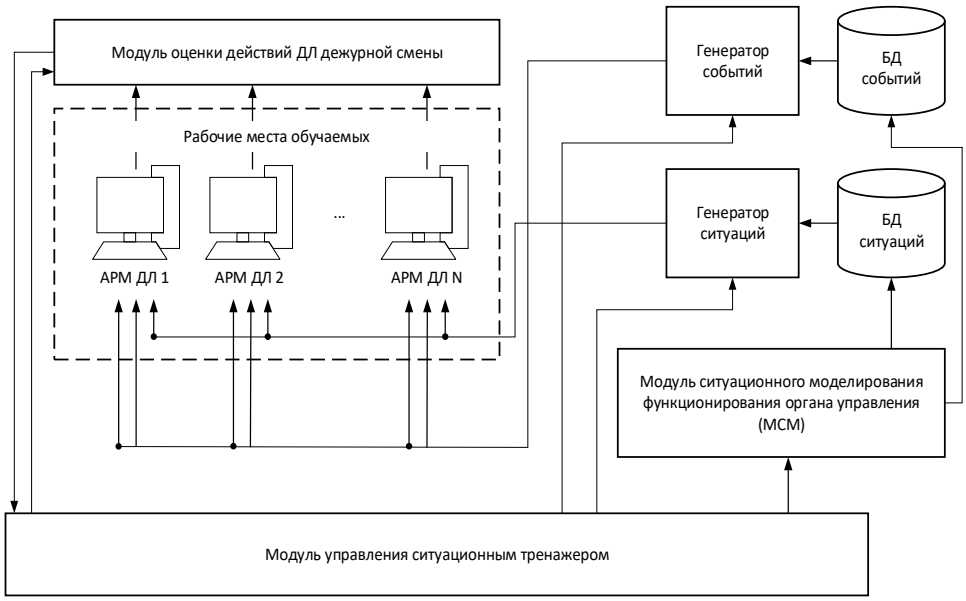


Рис. 1. Базовый вариант ситуационного тренажера

Модуль ситуационного моделирования функционирования органа управления позволяет создавать ситуационные модели функционирования ОУ различных типов. Результаты моделирования в виде типовых ситуаций и событий сохраняются в соответствующих базах данных (*БД ситуаций* и *БД событий*).

Генератор ситуаций позволяет, при задании определенного типа ОУ, воспроизводить типовые ситуации, присущие заданному органу управления в виде определенной последовательности типовых событий с последующей возможностью распределения их по АРМ ДЛ в соответствии с их функциональным назначением.

Генератор событий позволяет генерировать произвольные ситуации из упорядоченных последовательностей типовых ситуаций с последующей возможностью внесения дополнительных событий в процессе функционирования ситуационного тренажера, а также с возможность распределения их по АРМ ДЛ в соответствии с их функциональным назначением.

Модуль оценки действий должностных лиц (обучаемых) дежурной смены позволяет оценивать адекватность их действий в соответствии с поступающим потоком событий и ситуации в целом. При этом, обеспечивается возможность пояснения оценки действий обучаемых. На основе этого обеспечивается режим обучения, который, при необходимости, могут активировать обучаемые или руководитель занятия.

Модуль управления ситуационным тренажером обеспечивает реализацию методики обучения с помощью данного тренажера и конкретных алгоритмов его применения.

Процедуры применения ситуационного тренажера по подготовке должностных лиц органа управления представлен на рис. 2.

Последовательность процедур применения ситуационного тренажера по подготовке должностных лиц органа управления включает следующие этапы:

Этап 1. Ввод исходных данных:

типы моделируемых органов (пунктов) управления;

состав дежурных смен и распределение их по функциональным АРМ;

время тренировки (модельное время).

Этап 2. Проверка условия на наличие модели заданного типа органа (пункта) управления.

Если модель функционирования заданного типа органа управления имеется – осуществляется переход на этап 7, в противном случае – на этап 3.

Этап 3. Осуществляется выбор типа органа (пункта) управления, вводятся исходные данные для ситуационного моделирования его функционирования.

Этап 4. Ситуационное моделирование функционирования заданного типа органа (пункта) управления в соответствии с процедурами ситуационного анализа и ситуационного управления [2–7].

Этап 5. Запись результатов моделирования функционирования заданного типа органа (пункта) управления в базы данных событий и ситуаций.

Этап 6. Решение о использовании вариантов ситуаций для тренировки и обучения должностных лиц дежурных смен.

Если задается вариант использования типовых ситуаций (ранее записанных и имеющихся в соответствующей БД), то осуществляется переход на этап 7, в противном случае – на этап 9.

Этап 7. Генерация в рамках заданного модельного времени заданной типовой ситуации последовательным потоком типовых событий [2–7].

Этап 8. Решение о распределении поступления сообщений о событиях на АРМ обучаемых.

Если на все АРМ поступает общий поток событий, то осуществляется переход на этап 12, в противном случае – на этап 13.

Этап 9. Генерация в рамках заданного модельного времени произвольной (на усмотрение руководителя занятий) ситуации вводом типовых событий, описывающих данную ситуацию путем выбора их из имеющихся в БД событий.

Этап 10. Решение на ввод дополнительных событий.

Если в БД типовых событий недостаточно для описания заданной руководителем занятий ситуации, то осуществляется переход на этап 11, в противном случае осуществляется возврат на этап 8.

Этап 11. Осуществляется ввод дополнительных событий для полного описания заданной ситуации.

Ввод может осуществляться как вручную, так и с внешнего носителя. При этом автоматически осуществляется их запись в БД событий.

Этап 12. Осуществляется распределение событий по АРМ в соответствии с их функциональным назначением.

На каждый АРМ в этом случае поступают сообщения только по определенной тематике. В противном случае, в соответствии с отрицательным решением, принятым на этапе 8, на все АРМ поступает одинаковый поток сообщений обо всех событиях, характеризующих заданную ситуацию.

Этап 13. Действия обучаемых (их реакция) на сообщения о поступающих событиях.

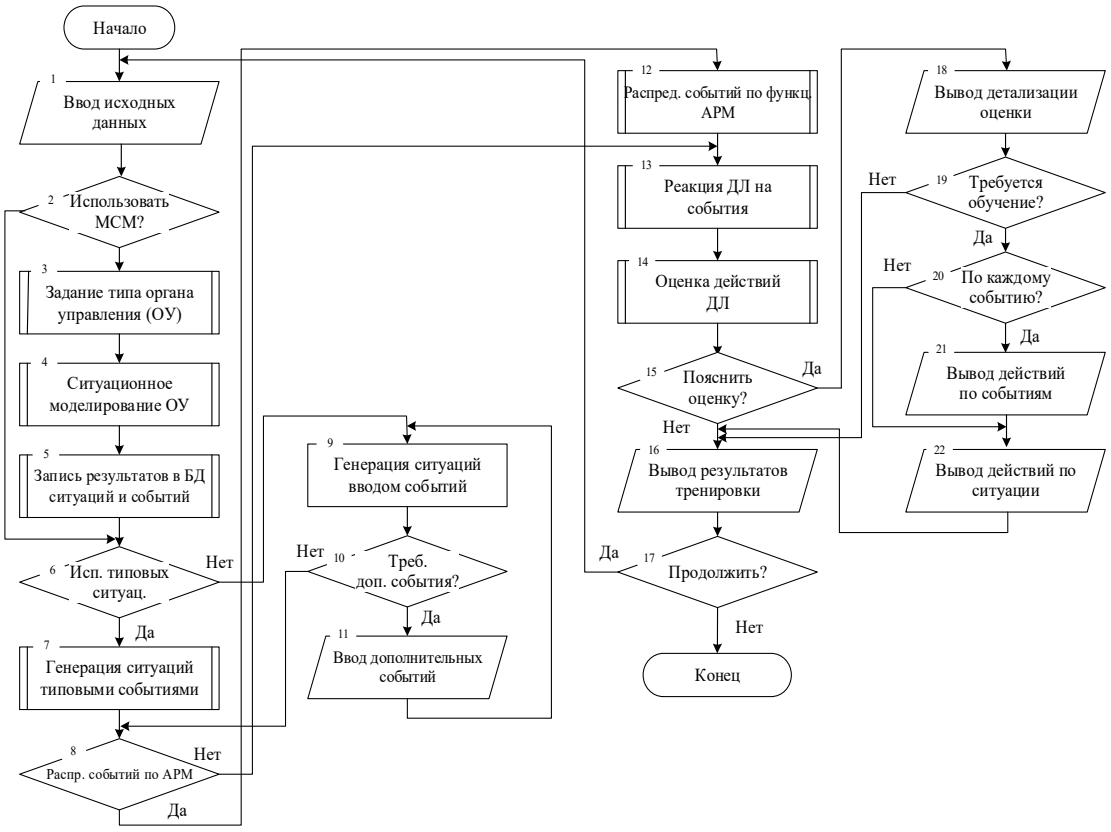


Рис. 2. Процедуры применения ситуационного тренажера

Действия обучаемых (их реакция) поступает в модуль оценки с одновременным отображением на мониторе руководителя занятий (модуля управления тренажером).

Этап 14. Оценка адекватности (правильности) действий должностных лиц (обучаемых) в модуле оценки по заданным критериям и показателям, доведение оценок до руководителя и обучаемых в реальном масштабе времени [2–7].

Этап 15. Решение о необходимости пояснения выставленной оценки.

Если по решению руководителя (обучаемого) требуется пояснение оценки действий (реакции) обучаемого на поступающие сообщения о событиях, то осуществляется переход на этап 18, в противном случае – на этап 16.

Этап 16. Вывод общих результатов текущей тренировки на монитор руководителя занятий и в документированном виде на бумажном носителе. При необходимости данные результаты могут быть сохранены на внешних носителях.

Этап 17. Решение о продолжении тренировки.

Если требуется продолжение тренажа, то осуществляется возврат на этап 1, в противном случае – завершение тренажа.

Этап 18. Вывод детализированной оценки действий обучаемых на мониторы их АРМ (при необходимости и на монитор руководителя занятий).

Этап 19. Решение о необходимости запуска режима обучения (принимается обучаемым или руководителем занятий).

Если принимается положительное решение, то осуществляется переход на этап 20, в противном случае осуществляется возврат на этап 16.

Этап 20. Решение о режиме обучения: по каждому событию или по ситуации в целом.

Если принимается решение о режиме обучения по каждому событию, то осуществляется переход к этапу 21, в противном случае – на этап 22.

Этап 21. Подробный вывод оценки (реакции обучаемого) по каждому событию.

Этап 22. Вывод оценки действий обучаемых по ситуации в целом.

Таким образом, методика применения ситуационного тренажера в соответствии с приведенной последовательностью процедур позволяет осуществлять подготовку должностных лиц дежурной смены, практически, любого органа (пункта) управления и контролировать ее качество в реальном масштабе времени с возможностью одновременного обучения путем анализа и оценки действий обучаемых, и подсказок в случае выявления ошибочных действий обучаемых.

Список литературы

1. Средства обучения: понятие, функции и классификация. [Электронный ресурс] URL: https://zaochnik-com.com/spravochnik/pedagogika/teorija-obuchenija/sredstva-obuchenija (дата обращения: 05.06.2023.

2. Агеев П. А., Кудрявцев А. М., Удальцов Н. П. Процедуры ситуационного моделирования деятельности должностных лиц органов управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 3. С. 218-224.

3. Агеев П. А., Кудрявцев А. М., Удальцов Н. П. Алгоритм ситуационного моделирования деятельности должностных лиц органов управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 3. С. 264-268.

4. Агеев П. А., Кудрявцев А. М., Удальцов Н. П. Моделирование типовых учебно-боевых мероприятий на основе вложенных ситуационных моделей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 7. С. 56-60.

5. Агеев П. А., Кудрявцев А. М., Удальцов Н. П. Распознавание и прогнозирование типовых учебно-боевых мероприятий с использованием ситуационных моделей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 8. С. 156-159.

6. Способ профессиональной подготовки должностных лиц органов управления радиомониторинга (Пат. РФ № 2776323, МПК G09B9/00, опубл. 18.07.2022, бюл. № 20).

7. Способ профессиональной подготовки должностных лиц органов управления радиомониторинга (Пат. РФ № 2777121, МПК G09B9/00, опубл. 01.08.2022, бюл. № 22).

Удальцов Николай Петрович, канд. воен. наук, профессор, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Агеев Павел Александрович, канд. воен. наук, доцент, pol18deligne@rambler.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного,

Михейкина Елена Викторовна, канд. техн. наук, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного

PROCEDURES OF THE USING SITUATIONAL SIMULATORS

N.P. Udalzov, P.A. Ageev, E.V. Miheykina

The Article discusses Procedures of the Using situational Simulators based on Modeling the activities of government officials in order to improve the Methods and Methods of work and improve the quality of Management.

Key words: official, management body, organization, situational modeling, situation, scenario, special software.

Udalzov Nikoly Petrovich, candidate of military sciences, professor, Russia, Sankt-Petersburg, Military Academy of Telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny,

Ageev Pavel Aleksandrovich, candidate of military sciences, docent, pol18deligne@rambler.ru, Russia, Sankt-Petersburg, Military Academy of Telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny,

Miheykina Elena Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, Russia, Sankt-Petersburg, Military Academy of Telecommunications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Bydyonny

УДК 004.891.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-321-322

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРИК СХОДСТВА И МЕТОДОВ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ В СЦЕНАРИЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ПО ИХ НАБОРАМ ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ

П.А. Савенков, А.Н. Ивутин

Целью исследования является анализ существующих методов машинного обучения и анализа естественного языка, а так же метрик сходства для решения задачи идентификации изменений в сценариях использования мобильных устройств пользователями по набираемым ими наборам текстовых данных их сравнение и выбор в качестве основы для программной реализации идентификации изменений.

Ключевые слова: анализ естественного языка, машинное обучение, большие данные, сбор и предварительная обработка данных, мобильный контроль.

Одной из самых быстроразвивающихся областей в искусственном интеллекте и машинном обучении является процесс поиска сходства данных. В упрощенном виде данная операция осуществляет сопоставление релевантных данных друг с другом. Идентификация изменений в сценариях использования мобильных устройств не является исключением [1].

При сравнении данных применяются следующие метрики сходства для анализа:

Сходство Жаккара;

Расстояние Левенштейна;

Косинусное сходство;

Евклидово расстояние;

Манхэттенское расстояние;

Чебычевское расстояние;

Метрика Минковского.

Сходство Жаккара является достаточно простой, но в свое время мощной метрикой [2]. Механизм поиска сходства реализуется при помощи вычисления числа общих слов между двумя текстами и его деления на общее количество элементов сравниваемых текстов. На рис. 1 представлено графическое представление пересечения и объединения множеств.

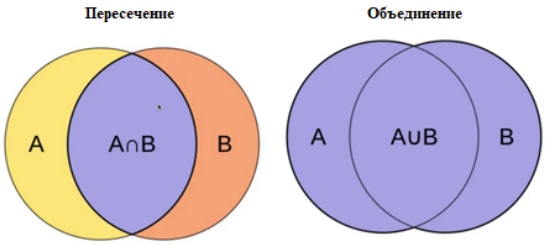


Рис. 1. Графическое представление пересечения и объединения множеств

Математическое определение сходства Жаккара (1) можно представить в следующем виде:

$$\text{Jaccar}(A,B) = \frac{Intersection(A,B)}{Union(A,B)} \quad (1)$$

где *A, B* – сравниваемые тексты; *Intersection (A, B)* – результат пересечения слов между текстами *A* и *B*; *Union (A, B)* – результат объединения слов текстов *A* и *B*.

Использование данного метода целесообразно, если исследуемыми объектами выступают множества. Это позволяет не формировать для них векторные представления, что требуется для использования иных метрик.

В случае сравнения наборов коротких пользовательских текстов, выбранных в двух последовательных временных интервалах, осуществляется формирование векторных представлений данных текстов, которое может включать дополнительный этап нормализации их весов (TF-IDF) и предварительную обработку. Их отсутствие негативным образом скажется на результате сравнения ввиду особенностей коротких пользовательских текстов.

Еще одной метрикой, работающей непосредственно с текстовыми представлениями, является *расстояние Левенштейна* (редакционное расстояние). В основе определения сходства между двумя сравниваемыми текстами лежит подсчет количества простых операций над единичными символами, который требуется выполнить над одной строкой для получения другой. Чем выше получаемое результирующее значение, полученное в результате использования данной метрики, тем сильнее отличаются друг от друга анализируемые тексты.

Применение данной метрики, для идентификации изменений в сценариях использования мобильных устройств на основе набираемых пользователями на них текстов, невозможно ввиду принципа работы алгоритма, близкого со сходством Жаккара, заключающегося в непосредственной работе с символьным представлением текстовых наборов, что не позволяет сохранить информацию о частоте используемых слов, осуществить их предварительную обработку и корректную нормализацию веса токенов.

Следующей рассматриваемой метрикой является *косинусное сходство*, Данная метрика зарекомендовала себя в анализе текстов, что подтверждается различными зарубежными и российскими исследованиями в данной области [3, 4]. Косинусное сходство отражает косинус угла между двумя сравниваемыми векторами в многомерном пространстве. Более высокое сходство наблюдается при меньшей величине угла между сравниваемыми векторами. Косинусное сходство (2) можно определить как скалярное произведение и норму:

$$similarity(A,B) = \frac{A \cdot B}{\| A \| \times \| B \|} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \times B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} A_i^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^2}} \quad (2)$$

где *A, B* – векторные представления признаков.

Результатом сравнения двух векторов признаков при помощи косинусной меры, является число определяющее значение сходства, находящееся в диапазоне от -1 до 1. Использование данной меры сходства позволит идентифицировать изменения в сценариях использования мобильных устройств на основе набираемых пользователями текстов.

Идентификация изменений в сценариях использования мобильных устройств требует применения различных подходов к анализу с целью получения корректных, многовариативных значений результата. Сравниваемые, последовательно выбранные текстовые наборы пользователей имеют не одинаковую длину, ввиду специфики сбора текстовых данных. Оценка частоты использования пользователем определенных терминов является одним из факторов идентификации изменений в сценарии использования мобильного устройства. Для решения данной задачи предлагается использовать Евклидово расстояние [5].

Математически Евклидово расстояние (3) может быть представлено в следующем виде:

$$r(x,y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \cdots + (x_n - y_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

где x, y – точки; n - размерность пространства.

Для сравнения пользовательских текстов при помощи Евклидова расстояния рекомендуется формировать вектор признаков по наборам пользовательских текстов схожих по длине во избежание получения некорректного результата анализа.

В отличии от косинусного сходства значение, полученное при помощи евклидова расстояния, будет отражать удаленность векторов признаков друг от друга. Чем выше значение, тем более удалены друг от друга векторы признаков, и соответственно зависимость сходства между двумя сравниваемыми текстами прослеживается менее явно.

Каждый вектор признаков активности пользователя, сформированный на основе набираемых в определенном временном интервале текстов, является многомерным, а каждое измерение отражает определенный признак.

Визуализация отличий значений косинусного сходства и Евклидова расстояния в трехмерном пространстве на примере сравнения двух векторов представлена на рис 2.

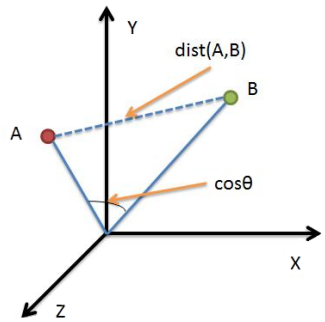


Рис. 2. Визуализация отличий косинусного сходства и Евклидова расстояния в трехмерном пространстве на примере сравнения двух векторов

Евклидово, Чебышевское и Манхэттенское (l1) расстояния являются частным случаем расстояния Минковского и также формируют результирующий коэффициент в зависимости от удаленности векторных представлений признаков. Однако результат, в определенных случаях, имеет отличия. На рис. 3 представлена визуализация отличий результатов определения удаленности векторов при помощи рассмотренных методов.

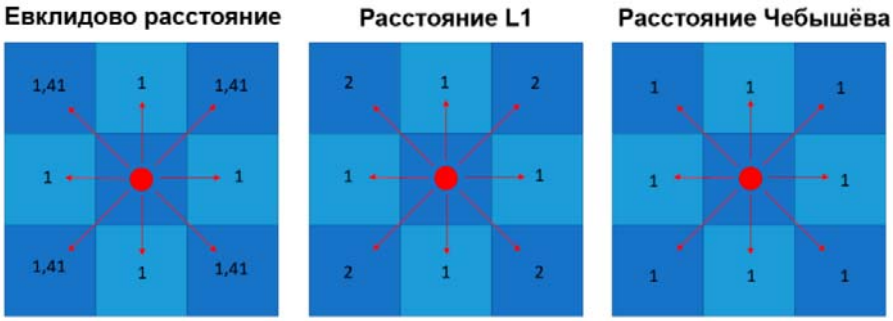


Рис. 3. Визуализация отличий результатов определения удаленности

Данные метрики сравнительно реже применяются для анализа векторных представлений наборов пользовательских текстов ввиду высокого уровня корректности результатов, получаемых при использовании Евклидова расстояния именно в многомерном пространстве. В результате исследования рассмотренных метрик сходства была составлена их сравнительная характеристика, представленная в табл. 1.

Сравнительная характеристика методов/метрик сходства для идентификации изменений в сценариях использования мобильных устройств

Метод / Метрика	Векторный анализ	Учет частот исп. терминов	Оценка различий векторов признаков	Применения в анализе текста	Прямая оценка сходства
Сходство Жаккара	-	-	-	+	+
Расстояние Левенштейна	-	-	-	+	+
Косинусное сходство	+	+/-	+	+	+
Евклидово расстояние	+	+	+	+	-
Манхэттенское расстояние	+	+	+	-	-
Чебычевское расстояние	+	+	+	-	-
Метрика Минковского	+	+	+	-	-

В ходе исследования метрик сходства и методов для идентификации изменений в сценариях использования мобильных устройств рассмотрены основные подходы, применяющиеся для сравнения текстов. Показано, что использование метрик, оперирующих непосредственно текстовыми представлениями, нецелесообразно ввиду потери информации о частоте использования пользователем слов и невозможности дополнительной нормализации.

Показаны различия косинусного сходства и Евклидова расстояния. Установлено, что для базовой идентификации изменений в сценарии использования мобильного устройства целесообразно применение косинусного сходства, а для оценки частоты использования пользователем определенных терминов рациональным является использование Евклидова расстояния.

Установлено, что вычисление Чебышевского и Манхэттенского расстояния менее актуально в анализе векторных представлений текстовых наборов, ввиду более высокой корректности результатов, получаемых при использовании Евклидова расстояния именно на многомерном пространстве.

Получено, что для идентификации изменений в сценариях использования мобильного устройства целесообразно использовать комбинацию косинусного сходства и Евклидова расстояния.

Список литературы

1.Carrasco R.S.M., Sicilia M.A. Unsupervised intrusion detection through skip-gram models of network behavior //Computers & Security. 2018. Т. 78. С. 187-197.

2.Жбанкова Е.А. Алгоритмы распознавания схожести текста в вопросно-ответных системах // Актуальные исследования. 2020. №. 6. С. 11-15.

3.Валиев А.И., Лысенкова С.А. Применение методов машинного обучения для автоматизации процесса анализа содержания текста // Вестник кибернетики. 2021. №. 4 (44). С. 12-15.

4.Singh R., Singh S. Text similarity measures in news articles by vector space model using NLP //Journal of The Institution of Engineers (India): Series B. 2021. Т. 102. С. 329-338.

5.Мухин А.С., Рыцарев И.А. Определение близости групп в социальных сетях на основе анализа текста с использованием больших данных // Сборник трудов ИТНТ-2019. 2019. С. 21-24.

Савенков Павел Анатольевич, старший преподаватель, pavel@savenkov.net, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ивутин Алексей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, alexey.ivutin@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

RESEARCH OF SIMILARITY METRICS AND METHODS FOR IDENTIFYING CHANGES IN USERS' MOBILE DEVICE USE SCENARIOS BY THEIR TEXT DATA SETS

P.A. Savenkov, A.N. Ivutin

The purpose of the study is to analyze existing methods of machine learning and natural language analysis, as well as similarity metrics to solve the problem of identifying changes in scenarios for using mobile devices by users based on the text data sets they type, their comparison and selection as the basis for software implementation of change identification.

Key words: natural language analysis, machine learning, big data, data collection and preprocessing, mobile control.

Savenkov Pavel Anatolyevich, senior lecturer, pavel@savenkov.net, Russia, Tula, Tula State University,

Ivutin Alexey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, alexey.ivutin@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 530.145
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-324-325

ТЕНДЕНЦИИ ПОВЫШЕНИЯ УЯЗВИМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ СО СТОРОНЫ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

А. В. Лукашев, В. В Шабуня., В. С. Сарафанников, В. В. Билан, Д.А. Иванов

Процесс перехода систем информационного обмена специального назначения на новый технологический уровень, применяющий системы квантовых коммуникаций, является многоплановым и сложным, как технически, так и организационно. Он требует тщательной подготовки и расчетов сил и средств. Нельзя забывать и о возможных рисках при переходе на новые системы – инструкции могут быть недостаточно проработаны, персонал недостаточно подготовлен, оборудование не всегда изготавливается с идеальным качеством и т.п. Все эти факторы требуют постоянного всестороннего контроля, поэтому необходимо налаживание оперативной обратной связи в управлении процессом внедрения систем квантового распределения ключей на информационных направлениях.

Ключевые слова: информационная безопасность, риски, квантовые вычисления, квантовые компьютеры, алгоритм взлома.

В течение первых месяцев 2023 года характер зарубежных экспериментов в сфере квантовых технологий изменился в сторону более глубокого исследования квантового мира. Ведущие мировые лидеры «квантовой гонки» заявляют о проведении успешных экспериментов и, на их основе, все более масштабных достижений. Рассмотрим некоторые из них, которые могут оказать влияние на текущие оценки рисков для информационной безопасности.

До недавнего времени считалось, что такие риски являются гипотетическими, либо их следует отнести к отдаленному будущему ввиду технически сложной реализации квантового компьютера с большим числом кубитов. Многие эксперты обосновывали свои выводы, в том числе, расчетами компании Google [3], которые используют свой подход к построению схемы квантового компьютера. В этой схеме каждый логический кубит нуждается во вспомогательных кубитах для исправления ошибок, следовательно, при создании, например, схемы с 20 тыс. кубитами потребуется 20 млн. физических кубитов. Такой квантовый компьютер занял бы площадь с городской квартал и потребовал бы мегаваттных источников энергии для обеспечения криогенного оборудования.

Российские эксперты, принимавшие участие в Форуме будущих технологий «Вычисления и связь. Квантовый мир», также поддерживают подобные оценки. Ниже мы приведем их мнения [4], в сравнении с мнениями некоторых других авторитетных экспертных инстанций.

Сделаем отступление. Основаниями для оценки сроков наступления рисков эксперты рассматривают следующие факторы:

1. Ошибки в квантовых вычислениях, которые требуют, как правильно указывает Google, большого числа вспомогательных кубитов, что фатально усложняет схему квантового компьютера.
2. Сложность процесса запутывания логических кубитов внутри квантовой схемы.
3. Трудность запуска алгоритма П. Шора [5] в связи с необходимостью квантового компьютера, емкостью более 4000 логических кубитов.
4. Короткие сроки декогеренции квантовых состояний, в течение которых необходимо успеть выполнить унитарные операции вычислений.
5. Трудности ввода исходных данных в квантовый компьютер.

Совокупность перечисленных факторов служила основанием для отнесения сроков наступления угроз для систем информационного обмена со стороны квантовых компьютеров на неопределенную перспективу. С другой стороны, угрозы могут приближаться по мере устранения данных факторов. По состоянию на конец 2022 года, все эти факторы присутствовали на достигнутом уровне технологического развития квантовых вычислений.

Допустимо предположить, что устранение факторов торможения развития квантовых вычислений, каждого в отдельности, или их совокупности, могут приблизить наступление таких угроз, в том числе, скачкообразно.

Рассмотрим положение дел по состоянию на дату проведения упомянутого Форума.

15 июня 2023 года российское агентство 3Dnews опубликовало результат эксперимента американской компании IBM, который существенно приближает сроки наступления рисков для существующих систем криптографии [6]. В проведенном эксперименте «с помощью передовых методов устранения ошибок» (Дарио Гил (Darío Gil), старший вице-президент и директор IBM Research) было продемонстрировано квантовое преимущество в решении задач моделирования по сравнению с современными суперкомпьютерами. С квантовым Eagle «соревновались» суперкомпьютеры Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли и Университета Пердью. В процессе масштабирования расчетной модели наступил момент, когда суперкомпьютеры перестали справляться с вычислениями, в то время как 127-кубитный Eagle продолжал выдавать правильные решения. Заявление старшего вице-президента компании IBM Дарио Гила о том, что «…мы вступаем в новую эру практической ценности квантовых вычислений», можно считать объявлением о скачкообразном изменении сроков наступления угроз для информационной безопасности, поскольку одним из «коньков» квантовых компьютеров являются именно задачи факторизации.

Итак, первый в нашем перечне фактор удалось решить в практическом эксперименте по коррекции ошибок в квантовой схеме методом модернизации алгоритма управления схемой. Далее последует усовершенствование технологии, а поскольку проблема не техническая, а программная, разумно предположить, что решаться она будет достаточно оперативно.

К этому следует добавить, что через три года компания IBM планирует запустить квантовый компьютер, емкостью 4000 кубитов, именно столько, сколько нужно для запуска алгоритма П. Шора.

Второй фактор – 12 июля 2023 года китайские коллеги опубликовали результаты успешного эксперимента по запутыванию 51 кубита внутри схемы квантового процессора, что является новым мировым достижением [7]. Разумеется, это всего лишь шаг, но шаг важный, и он свидетельствует о продвижении исследователей на пути развития схем квантовых вычислителей. Для темы нашей статьи он имеет значение в аспекте приближения сроков

наступления угроз для информационной безопасности.

Третий фактор – трудность запуска алгоритма П. Шора связана именно с относительно небольшим числом логических кубитов в схемах современных квантовых процессоров, которого достигли исследователи в разных странах. Но здесь уместно привести результаты, по крайней мере, двух достижений.

В работе [8] показано, что китайские ученые сделали попытку опровергнуть прогнозы экспериментом, в котором осуществлен, как они уверяют, успешный, взлом криптосистемы RSA-48 при помощи 10-ти кубитного компьютера [9]. Для этого понадобилось использовать не алгоритм Питера Шора, а алгоритм Клауса Шнорра [10], усилив в нем прогресс факторизации с помощью своего дополнительного протокола QAOA (Quantum Approximation Optimization Algorithm). Исследователи утверждают, что алгоритм RSA-2048, с помощью их метода путем масштабирования, может быть взломан с помощью 372-кубитного квантового компьютера. В статье приводится таблица требуемых характеристик квантового компьютера для последовательного взлома криптосистем RSA-128, 256, 512, 1024, 2048.

Ниже приводим логическую схему этого эксперимента. Применена гибридная схема вычислений – квантовый компьютер был объединен с классическим. Алгоритм содержит 4 процессорных блока (рис. 1).

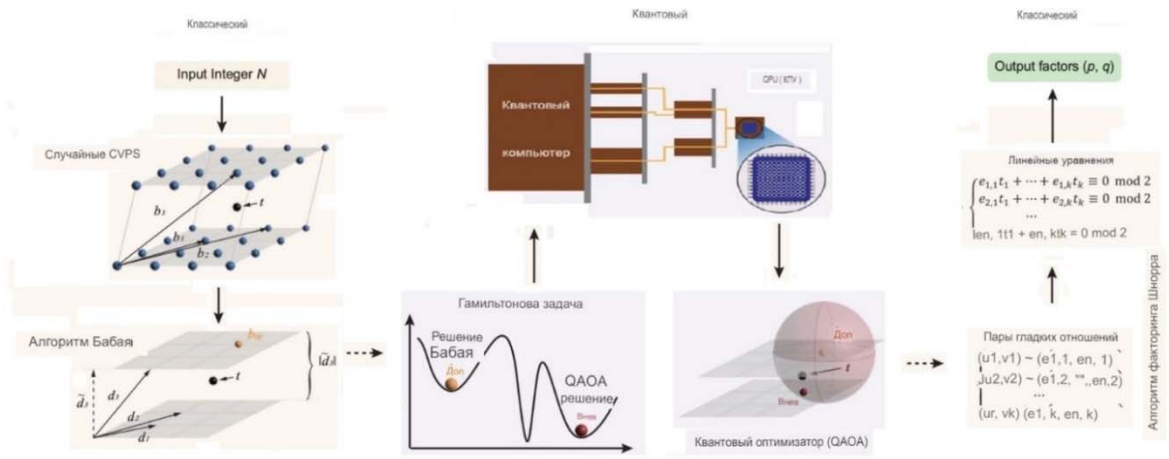


Рис. 1. Универсальный квантовый алгоритм целочисленной факторизации

В первом блоке осуществляется предварительная обработка данных для поиска ближайшего вектора (CVP) на решетке. Для эффективного решения задачи использован квантовый оптимизатор QAOA (Quantum Approximation Optimization Algorithm) наиболее трудоемкой части алгоритма Шнорра, в результате чего повышается общая эффективность процесса факторинга. Алгоритм Шнорра включает в себя поиск достаточного количества пар гладких связей (sr-пар) и решение полученной системы линейных уравнений. Системы линейных уравнений эффективнее решать на квантовом компьютере, поэтому второй блок осуществляет на нем оптимизацию результатов первого этапа с целью поиска более близкого решения задачи поиска вектора CVP.

Третий шаг также выполняется на квантовом компьютере. Количество кубитов, требуемое для квантовой схемы оптимизации пропорционально размерности примененной на первом шаге решетки. Авторская схема соединения кубитов вкупе с системой алгоритмов управления схемой позволила использовать минимальное количество кубитов для решения задачи – для факторизации m-разрядного целого числа N количество кубитов, требуемое в алгоритме, равно O (m /logm), что является сублинейным масштабом m, по сравнению с (m) кубитами в алгоритме Шора. Этим экспериментом авторы проложили новый путь решения задач факторинга с использованием минимальных ресурсов за приемлемое время.

Ценностью эксперимента также является примененная авторами гибридная схема «классический-квантовый компьютер». Такая схема ускоряет процесс факторизации, с одной стороны, и упрощает взаимодействие пользователя с квантовым компьютером, с другой стороны, т.е., данная схема упрощает ввод/вывод данных с квантового компьютера. А это имеет отношение к пятому фактору, влияющему на сроки наступления угроз информационной безопасности.

Четвертый фактор мы не будем рассматривать в связи с (временным) отсутствием известий о существенных успехах преодоления трудностей в деле удержания когерентных квантовых состояний кубитов в квантовых схемах.

Мы можем дополнить наши доводы о прогрессе рисков угроз некоторыми другими примерами из различных областей, которые, в общем случае, не имеют прямого отношения к протоколам взлома, но косвенно на него влияют. Руководитель группы исследователей из Riverlane Николь Хольцман изменила свою оценку расчета энергетических состояний 50-ти электронов с одного года до нескольких дней. Для этого понадобилось *изменить алгоритмы* вычислений в квантовом компьютере между группами логических кубитов [11].

Еще пример – опубликовано квантовое моделирование иона сульфония (H_3S), связанного с молекулой трифенилсульфония. Расчет имел важное значение в литографическом производстве – фотокислота реагирует на свет определенных длин ультрафиолетовых волн. Для повышения эффективности технологии необходимо понимание молекулярных и фотохимических свойств процесса. В начале исследований объем и сложность вычислений казались невозможными на существующих вычислительных системах. Тогда команда разработчиков обратилась в компанию IBM, которая предоставила для расчетов свой 27-ми кубитный квантовый компьютер Falcon. В результате моделирование, которое ранее казалось невозможным в принципе, было выполнено в разумные сроки [11].

Рассмотрение темы кубитной сложности было бы неполным, если бы мы не рассмотрели альтернативные способы создания квантовых схем. Одним из таких направлений является применение так называемых кудитов вме-

сто кубитов. Кудит – квантовая частица, которая содержит не два, как кубит, а большее число уровней квантовых состояний. Таких уровней может быть три, четыре, пять и более. Соответственно, кудиты называют кутриты, квартиты, куквинты и т.д.

Преимущество кудитов над традиционными кубитами наглядно показали исследователи из Российского квантового центра Сколково и Национального университета науки и технологий МИСиС [12], опубликованного 20 февраля 2023 года. Дополнительные уровни кудитов можно использовать в качестве вспомогательных элементов схемы вычислителя. Другой подход состоит в использовании пространства кудитов для создания в нём нескольких кубитов. Этот подход сокращает количество операций при вычислениях. В представленном исследовании авторы предложили объединить эти подходы на основе использования куквинтов, пятиуровневых систем.

Суть эксперимента состояла в использовании первых четырёх уровней куквинта в качестве информационных для создания двух кубитов, а пятый уровень использовался в качестве вспомогательного для хранения временных данных.

Эффективность предложенной схемы с куквинтами была рассмотрена на примере реализации алгоритма Гровера в сравнении со схемами на традиционных кубитах, и кутритах. Мы дополнили ее собственными расчетами для куквартов. Результаты анализа представлены на рисунке 2.

Подсчёт необходимого числа операций велся для количества физических схем (кубитов, кутритов и куквинтов) с n=(2, 3, …10). В случае с кубитами потребовалось иметь (n – 2) вспомогательных кубитов. В случае с кутритами вспомогательный кубит не требуется – используется третий уровень кодирования. В случае с куквинтами, как следует из рисунка, при числе физических систем (n = 8) возможно уменьшить количество двухчастичных вентилей в реализации алгоритма Гровера более чем на порядок по сравнению с его реализацией «только-кубиты».

Ниже проиллюстрированы результаты эксперимента [12], в котором авторы решали задачу разложения вентиля Тоффоли с применением алгоритма Лова Гровера [13].

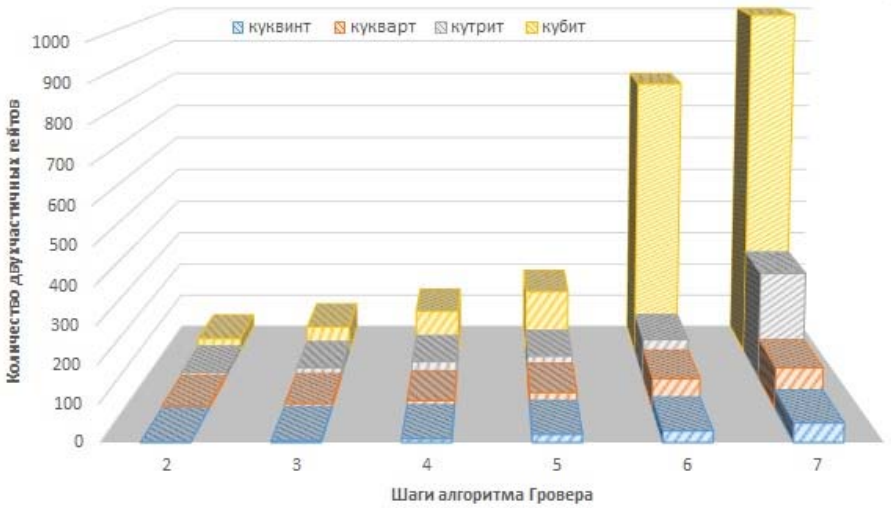


Рис. 2. Потребность в квантовых носителях и эквивалентный объем квантового компьютера на примере алгоритма Л. Гровера

Таким образом, для решения однотипной задачи с использованием 88 куквинтов, потребовалось бы 1000 кубитов.

Представленный эксперимент решает задачу совершенствования схемы квантового процессора. Меньшее число физических носителей образуют существенно большее число логических кубитов, следовательно, делают схему вычислителя более мощной. Для темы нашей статьи такой подход может рассматриваться в аспекте скачкообразного наступления сроков реальных угроз существующим системам информационного обмена со стороны квантовых технологий, поскольку создание мощного квантового компьютера существенно упрощается.

Существует множество других оценок наступления рисков для информационных систем. Из анализа характера изменения таких оценок можно сделать следующие выводы:

составить относительно точный прогноз наступления критических рисков в аспекте угроз системам информационного обмена невозможно в силу их разнородности по объектам оценок и характеру решаемых задач, в результате чего разные оценки могут отличаться друг от друга на порядки;

на оценку вычислительных возможностей квантовых компьютеров сильное влияние оказывают различные факторы, например применение более совершенных алгоритмов вычислений, совершенствование систем подавления шума вкупе с методами исправления ошибок, использование в квантовых процессорах вместо кубитов многоуровневых кудитов, существенно повышающих эффективность вычислений и упрощающих квантовые схемы и протоколы запутывания внутри них и т.п.;

некоторые эксперименты можно считать прорывными, которые риски приближают не экспоненциально, а скачкообразно, как это произошло с экспериментом компании IBM, представленном выше. Также прорывным следует считать и эксперимент отечественных исследователей, применивших в квантовой вычислительной схеме вместо кубитов – куквинты, показав реальную эффективность этого нового пути создания квантовых схем.

Рассмотрим взгляды на реальность угроз для существующих систем информационного обмена со стороны квантовых компьютеров на основе анализа мнений отечественных экспертов в этой области, высказанных на заседании Круглого стола в рамках Форума, в сравнении с международным сообществом экспертов, представленном в аналитической статье агентства Moody’s [14] и в Отчете Института глобальных рисков (г. Торонто, Канада) за 2022

год [15]. Этот институт является наиболее авторитетной экспертной организацией в мире в сфере угроз, имеющих глобальный характер в различных областях. В последние годы он рассматривает и угрозы со стороны квантовых технологий. В конце заседания Круглого стола из зала последовал вопрос по поводу китайского эксперимента по взлому криптосистемы, который мы представили выше [9].

В табл. 1 приведены мнения – отечественных экспертов по поводу этого эксперимента, левая колонка, и мнение экспертов агентства Moody's.

Таблица 1

Сравнение экспертных оценок.

Мнения отечественных экспертов [4]	**Мнение экспертов агентства Moody's**
С.П. Кулик, профессор, научный руководитель центра квантовых технологий МГУ: «… Я слышал об этой китайской статье, но не разбирался, когда я начал разбираться, то понял, что не очень интересно, взлома никакого не было, показан некий путь, по которому можно пойти, чтобы с ограниченным ресурсом определенный алгоритм сломать. Почему я перестал читать, потому что эта китайская 100-кубитная система, это совершенной не масштабируемый вариант… это тупиковый путь, поэтому серьезно не надо относиться к этой публикации».	1. Многие компании осознают, что им необходимо разработать стратегию защиты от квантовых угроз уже сегодня, чтобы защитить свою цифровую инфраструктуру в эпоху квантовых вычислений. 2. Новая исследовательская работа, опубликованная в декабре 2022 года, предлагает новый способ факторизации, который может резко сократить временной график и повысить срочность стратегий защиты. 3. Если основные гипотезы статьи верны, сроки потенциально могут быть сокращены на много лет… 4. Однако наш предварительный анализ показывает, что доказательство времени сходимости алгоритма довольно расплывчато, что является единственным возможным способом оспорить допущение о стойкости RSA. 5. Чтобы получить наилучшую производительность QAOA, необходим баланс бонуса вычислений и эффекта шума. 6. Тем не менее, заинтересованные стороны должны следить за эмпирическим прогрессом этих подходов… поскольку в литературе появляются новые квантовые алгоритмы. 7. …эта исследовательская работа прокладывает путь для факторизации больших чисел реалистичной криптографической значимости, хотя этого недостаточно. 8. Мы рекомендуем следовать рекомендациям NSA/NIST и немедленно начать подготовку стратегии защиты от угроз (*со стороны квантовых компьютеров – авт.*).
Б. Глазков, вице-президент по стратегическим инициативам ПАО «Ростелеком»: «На данный момент доказанных угроз классической криптографии практически не существует. Существует гипотетическая угроза, которая заключается в том, что появление квантовых компьютеров может повлечь за собой компрометацию таких алгоритмов, как RSA, «Кузнечик»»	
А. Р. Ефимов, вице-президент ПАО «Сбербанк, ведущий специалист по робототехнике: «…Представленная китайская 100-кубитная система не является масштабируемым вариантом и не имеет перспектив развития. Данная задача была проэмулирована, по эквиваленту была написана статья. С математической точки зрения результаты китайских исследований неудовлетворительны и находятся на грани научного фейка. Вскрытие RSA еще далеко».	

Для большей убедительности острожного подхода к оценке угроз, мы приводим выдержки из Отчета Института глобальных рисков, содержащие альтернативные мнения об их наступлении. В этом Отчете представлены результаты опроса, проведенного evolutionQ Inc. при участии 40 ведущих мировых экспертов по квантовым вычислениям (список экспертов приведен в приложении к Отчету):

«Организации не смогут вовремя защитить свои активы от квантовых атак, если квантовая временная шкала угроз короче, чем сумма сроков годности и времени миграции (перехода на квантовые системы – авт.).

Большинство экспертов (27 из 40) оценили, что угроза существующим криптосистемам с открытым ключом в ближайшие 5 лет составляет «70%», предполагая, что существует значительная вероятность того, что квантовая угроза становится конкретной в этот период времени.

Мы собрали предположения экспертов о том, что квантовая угроза для кибербезопасности будет становиться существенной и относительно быстрой, и вполне может стать критической раньше, чем многие ожидают».

Исследование Института глобальных рисков является слишком обширным, чтобы его здесь детально описывать. Вдумчивый читатель и ответственное за информационную безопасность должностное лицо внимательно проштудируют его и примут ответственное решение. Ссылка на Отчет приведена в списке источников.

Ниже, на рис. 3, мы приводим итоговую диаграмму, отображающую интегрированную сумму оценок экспертов, принявших участие в опросе.

В общем случае, срок окончания перехода на квантовые системы защиты информации определяется из соотношения (1):

$$T_{хр} + T_{пер} > T_{угр} \quad (1)$$

где $T_{хр}$ – необходимый строк хранения данных; $T_{пер}$ – время, необходимое для перехода с существующих на квантовые системы шифрования; $T_{угр}$ – ожидаемое время наступления реальных угроз.

Поскольку опытные образцы квантовых вычислительных систем уже существуют, а алгоритмы управления ими разрабатываются, допустимо предположить, что опытные образцы квантовых компьютеров, представляющих угрозу для существующих криптосистем, могут появиться в течение ближайших 4-5 лет. Серийное производство таких средств и систем, по существующему мировому опыту внедрения новых информационных технологий, следует ожидать в течение ближайших 6-8 лет.

Сроки могут измениться в любую из сторон. При этом в меньшую сторону такое изменение может состояться в случае прорывных открытий в технологиях, как и в совершенствовании протоколов управления квантовыми схемами. В случае отсутствия прорывных достижений, например, из-за изменения экономической ситуации в части инвестирования проектов в квантовых вычислениях, сроки могут увеличиться. Такое замедление уже сейчас наблю-

дается в западных странах на фоне осознания сложности проектов и увеличения ожидаемых сроков окупаемости дорогостоящих разработок, появления более привлекательных высокотехнологичных проектов, обещающих более выгодные условия финансовых вложений, например, создание нейроморфных систем искусственного интеллекта.

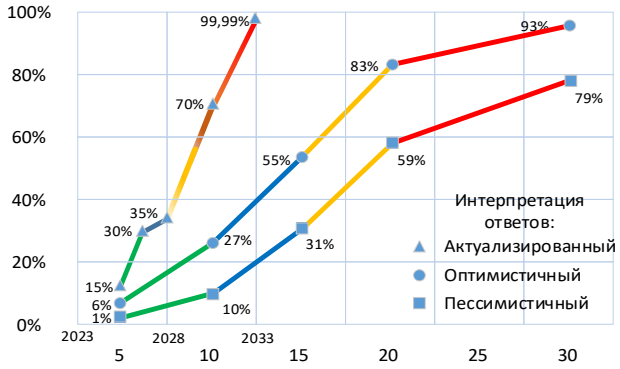


Рис. 3. Оценки совокупной вероятности взлома RSA-2048 за 24 часа, в зависимости от временных периодов («оптимистичный» и «пессимистичный» варианты оценки по мнению экспертов Института глобальных рисков, «актуализированный» – вариант авторов статьи на основании анализа событий, по состоянию на первую половину 2023 года)

В своих оценках мы руководствовались информацией о попытке взлома криптосистемы RSA-48 китайскими исследователями, появлением квантовых процессоров на куквинтах, сообщением команды IBM об апробации «передовых методов устранения ошибок», анализом материалов агентства Moody's и содержанием Отчета Института глобальных рисков, а также разнородными сообщениями о «неожиданных» успехах в моделировании сложных систем на квантовых компьютерах, выполнить которые с помощью классических методов невозможно.

Постквантовые системы криптографии. Ряд экспертов, скептически относящихся к «квантовой угрозе», высказывают мнение о том, что оперативный переход на квантовые системы не является критичным. Информационную безопасность предлагается обеспечивать на так называемых постквантовых или квантовоустойчивых алгоритмах шифрования. Такой подход существует наряду с предложениями перехода на системы квантового распределения ключей. Таким образом, существует два основных подхода к решению проблемы угроз информационной безопасности со стороны квантовых компьютеров.

Постквантовая криптография, основанная на создании новых асимметричных криптографических алгоритмов, построенных не на задачах разложения чисел на простые множители, а на других сложных математических задачах, при решении которых квантовый компьютер, предположительно, не будет иметь преимуществ. К таким решениям относят следующие:

Криптография, основанная на хеш-функциях.

Криптография, основанная на кодах исправления ошибок.

Криптография, основанная на решётках.

Криптография, основанная на многомерных квадратичных системах.

Шифрование с секретным ключом.

Стеганография [16].

Постквантовая криптография сегодня внедряется, в первую очередь, в межбанковских коммуникациях, в корпоративных системах информационного обмена и системах электронного документооборота государственных органов. Для них уже существуют коммерческие библиотеки, решения, продукты. В настоящее время такие системы проходят процедуры стандартизации и сертификации. В России, как и во всем мире, идёт процесс выбора технологий, которые будут стандартизированы к концу 2024 года. Следует признать, что внедрение постквантовых алгоритмов шифрования имеет неоспоримые преимущества: они просты и быстро реализуемы при интеграции с существующими программно-аппаратными комплексами, обеспечивают регулярные обновления программ.

Однако им присущ фундаментальный недостаток – секретность постквантовой криптографии основывается на предположениях о сложности решения определённых классов математических задач.

Цитируем эксперта – «Всегда есть гипотетическая вероятность того, что появится постквантовый компьютер, с помощью которого можно будет взламывать и постквантовые алгоритмы. В отличие от квантового распределения ключей здесь нет фундаментально доказуемой стойкости – такие алгоритмы продолжают изучаться на предмет устойчивости к взлому» [17].

В этой связи, целесообразно организовать синергичное сосуществование двух подходов к обеспечению надежной информационной безопасности. Обобщив разработанные нами в работах [18, 19, 8] предложения в части динамического алгоритма такого сосуществования, ниже на рисунке 4 мы представляем оптимальное решение.

Опишем алгоритм, приведенный на рис. 4.

Алгоритм построен в предположении, что наиболее важные информационные направления уже переведены на системы квантового распределения ключей. Менее важные направления используют существующие и посквантовые системы в соответствии с принятой ранжировкой их важности. Рассмотрим блоки алгоритма.

Блок «Мировое развитие квантовых технологий». Побочное следствие развития представляет угрозу существующим, в том числе, постквантовым системам криптографии, создавая «давление» рисков. По мере роста рисков, на основании аналитических оценок, целесообразно переводить информационные направления, находящихся в верхней части списка ранжированных направлений, в Блок «Системы квантового распределения ключей».

Блок «Системы квантового распределения ключей», пополняясь новыми направлениями из числа постквантовых, будет расти. Поэтому выше обозначен прирост количества информационных направлений этого блока.

Для обеспечения такого прироста необходимо соответствующее оборудование и подготовленная инфраструктура, отвечающая требованиям организации квантовых каналов. Исходя из этого, в органы управления системами специального назначения научными учреждениями этих ведомств направляются обоснованные аналитическими исследованиями предложения по плановому переводу направлений на квантовые технологии.

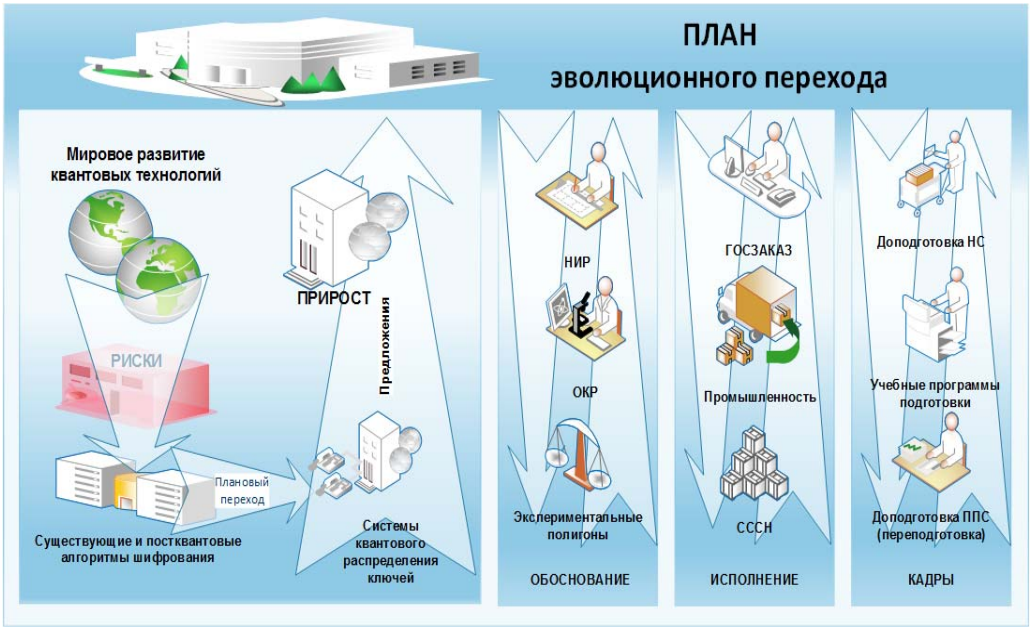


Рис. 4. Алгоритм синергичного сосуществования постквантовых и квантовых алгоритмов шифрования

Блок «Обоснование» включает три уровня обоснований в потребностях квантового оборудования и элементов инфраструктуры.

1. Теоретическое обоснование требований, структуры и состава квантовых комплексов технических средств, а также требования к протоколам и линиям, которые будут использованы под квантовые каналы. НИРы переходят в ОКРы.
2. В опытно-конструкторских работах создаются макеты и прототипы оборудования и систем.
3. На экспериментальных полигонах проводятся эксперименты по проверке разработок. При этом программы испытаний должны обязательно предусматривать систему квантовых атак и применение методов защиты от них.

По результатам выполненных исследований, в адрес органа управления направляются обоснованные предложения по перечню информационных направлений, подлежащих переводу на системы квантового распределения ключей (показано стрелой). Орган управления рассчитывает потребности в оборудовании по номенклатуре и планирует мероприятия по подготовке линий на соответствующих информационных направлениях.

Блок «Исполнение» также содержит три уровня – планирования и размещения государственного заказа в промышленности, производства и сдачи в эксплуатацию квантового оборудования и передачу его государственному заказчику для распределения в системах связи специального назначения.

Блок «Кадры» также содержит три уровня – разработку учебных программ для нового предмета «Квантовые технологии в системах связи специального назначения», доподготовку научных сотрудников и профессорско-преподавательского состава, которые обеспечивают эксплуатацию новых систем связи квалифицированным персоналом.

С учетом выше представленной формулы соотношения параметров рисков (1), критический срок окончания перехода информационных систем с существующих на квантовые системы шифрования определяется формулой:

$$T_{пер}^{max} = T_{угр} - T_{хр} \quad (2)$$

Формулу (2) следует читать как «Максимальный срок окончания перехода на квантовые системы шифрования определяется как разность сроков наступления конкретных (реальных) угроз и необходимым временем хранения (пригодности) защищаемых данных.

К перечню вопросов обоснования планового перехода на новый технологический уровень следует отнести следующие:

оценку угроз в аспекте сроков приближения к критическим уровням информационной безопасности;

рекомендации по ранжированию информационных направлений по важности с учетом разнородных факторов;

обобщенные выводы из анализа мониторинга зарубежных исследований и экспериментов;

обоснование применимости опыта зарубежных достижений для отечественных систем связи;

Заключение.

1. С учетом представленного в статье анализа, мы полагаем, что критические риски для классических систем криптографии могут наступить ранее сроков, обоснованных в предыдущих оценках. Опытные образцы систем

взлома могут появиться в течение ближайших четырех-пяти лет, а серийные образцы, как элемент «квантовой войны», по терминологии НАТО, войдут в практику применения в ближайшие шесть-восемь лет. Наша оценка обоснована, во-первых, на обычной практике разработок и внедрения новых информационных технологий. Во-вторых, текущим состоянием зарубежных, в первую очередь западных, исследований и уровнем освоения ими квантовых технологий в сфере вычислений и коммуникаций.

Здесь следует указать и на новое сообщение – 4 мая 2023 года российское сетевое агентство «3DNEWS», со ссылкой на американское агентство Semiconductor Digest, сообщило [20], что в США уже приступили к проектированию квантовых процессоров для серийного производства квантовых компьютеров, объемом в миллион кубитов.

2. В странах запада существуют и разрабатываются множество алгоритмов квантового распределения ключей. В зависимости от задач и условий, процедура формирования и распределения ключей может иметь значительные различия, а параметры квантовых каналов существенно выше, чем в традиционных, порой, устаревших протоколах.

3. По данным открытой печати, отставание отечественных технологий от технологий западных стран в области протоколов квантового распределения ключей и используемого для этой технологии оборудования увеличивается. Об этом свидетельствуют факторы, показанные выше, в дополнение к которым можно привести факт отсутствия в учебной программе военных вузов предмета «Квантовые коммуникации».

4. Ряд экспериментов подтверждают эффективность использования кудитов в системах квантового распределения ключей. Здесь следует отметить, что при своевременном решении о разработке такой технологии отечественные системы связи в сетях специального назначения могут совершить «квантовый» скачок в своем развитии.

5. С учетом предположений в п. 1, следует готовить национальные системы информационного обмена, радиоэлектронную промышленность и кадры для эксплуатации квантовых систем коммуникаций в обозначенные сроки. Крайне важно, в ближайшее время получить технические решения квантового распределения ключей для сетей мобильной военной связи.

Список литературы

1. Федеральный закон «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ услуг…» [Электронны ресурс] URL: https://consultant.ru/documents/144624 (дата обращения: 10.05.2023).

2. «Новые и прорывные технологии», НАТО, декабрь 2022 г. (по состоянию на 3 января 2023 г.). [Электронны ресурс] URL: https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_184303.htm (дата обращения: 10.05.2023).

3. М. Брукс, Квантовые компьютеры: для чего они нужны? [Электронны ресурс] URL: https://doi.org/10.1038/d41586-023-01692-9 (дата обращения: 10.05.2023).

4. Международный Форум будущих технологий «Вычисления и связь. Квантовый мир» [Электронны ресурс] URL: https://www.4future-forum.tech (дата обращения: 10.05.2023).

5. P. Shor, Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring, in Proc. 35th Ann. Symp. on Foundations of Computer Science, 1994. P. 124–138.

6. Г. Детинич. IBM: квантовые компьютеры станут практически полезными раньше, чем ожидалось. [Электронны ресурс] URL: https://www.nature.com/articles/s41586-023-06096-3 (дата обращения: 10.05.2023).

7. C. Cao et.al. Generation genuine entanglement up to 51 supercondacting qubits – 12.07.2023. [Электронны ресурс] URL: https://www.nature.com/articles/41586-023-06195-1 (дата обращения: 10.05.2023).

8. Лукашев А.В., Шабуня В.В. и др. Квантовые технологии в системах связи специального назначения: информационно-аналитический обзор. СПБ: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. 165 с.

9. Bao Yan et.al. Factoring integers with sublinear resources on a superconducting quantum processor [Электронны ресурс] URL: https://arxiv.org/pdf/2212.12372.pdf (дата обращения: 10.05.2023).

10. C. P. Schnorr, Fast factoring integers by SVP algorithms, corrected, Cryptology ePrint Archive (2).

11. П. Котов, Миллионы квантовых операций в секунду: Microsoft построит квантовый суперкомпьютер в ближайшие 10 лет, 22.06.2023. [Электронны ресурс] URL: https://3dnews.ru/1088785/microsoft-postroit-kvantoviy-superkompyuter-v-bligayshie-desyat-let (дата обращения: 10.05.2023).

12. Anstasiia S. Nikolaeva, Evgeniy O. Kiktenko, Aleksey K. Fedorov , - Generalized Toffoli Gate Decomposition Using Ququints: Towards Realizing Grover's Algorithm with Qudits. DOI: 10.3390/e25020387.

13. База знаний QAPP: Алгоритм Гровера простыми словами [Электронны ресурс] URL: https://qapp.tech (дата обращения: 10.05.2023).

14. Quantum Experts Debunk China Quantum Factoring Claims [Электронны ресурс] URL: https://www.quantumcomputingreport.com (дата обращения: 10.05.2023).

15. RSA and Diffie-Hellman Cryptosystems [Электронны ресурс] URL: https://www.moodysanalitics.com/articles/2023/rsa-and-diffie-hellman-cryptosystems-under-threat-sooner-than-previously-thought (дата обращения: 10.05.2023).

16. Цифровая стеганография: Учебник/ В.И. Коржик, А.В. Красов. М.: КНОРУС, 2023. 324 с.

17. А. Федоров. Зачем нужны квантовые рельсы и как будут спасать данные в постквантовом мире, [Электронны ресурс] URL: https://hightech.fm/-2021/08/11/quantum-rails (дата обращения: 10.05.2023).

18. Лукашев А.В, Сарафанников В.С. На пороге глобального технологического перехода, Международный журнал гуманитарных и естественных наук, №3, Том 2. С. 57-6.

19. Лукашев А.В., Шабуня В.В. Квантовая устремленность как угроза информационной безопасности, Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. Т.8, №6(32), 2023. С. 97-102.

20. Детинич Г. Процессоры для квантового компьютера на 1 млн. кубитов будут выпускать в США на заводе прошлого века, 04.05.2023, Сетевое агентство 3ДНьюс, Daily Digital Digest/10-86179. [Электронны ресурс] URL: https:///protsessri-dlya-kvantovogo-kompyutera-na-million-kubitov-budutrazrabativat-i-vipuskat-v-ssha-na-zavjde-proshlogo-veka (дата обращения: 10.05.2023).

Лукашев Анатолий Викторович, канд. воен. наук, старший научный сотрудник, Россия, Санкт-Петербург, Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Шабуня Владимир Валентинович, канд. воен. наук, старший научный сотрудник, Россия, Санкт-Петербург, Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Сарафанников Виталий Семенович, старший научный сотрудник, Россия, Санкт-Петербург, Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Билан Виктория Викторовна, младший научный сотрудник, Россия, Санкт-Петербург, Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Иванов Денис Александрович, канд. техн. наук, преподаватель, prosto_deniss@mail.ru, Россия, Челябинск, Филиал Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина

TRENDS IN INCREASING VULNERABILITY OF MODERN INFORMATION SYSTEMS BY QUANTUM COMPUTERS

A. V. Lukashev, V. V. Shabunya, V. S. Sarafannikov, V. V. Bilan, D.A. Ivanov

The process of transition of special-purpose information exchange systems to a new technological level using quantum communication systems is multifaceted and complex, both technically and organizationally. It requires careful preparation and calculations of forces and means. We should not forget about the possible risks when switching to new systems – instructions may not be sufficiently developed, personnel are not sufficiently trained, equipment is not always manufactured with ideal quality, etc. All these factors require constant comprehensive control, therefore, it is necessary to establish operational feedback in managing the process of implementing quantum key distribution systems in information areas.

Key words: information security, risks, quantum computing, quantum computers, hacking algorithm.

Lukashev Anatoly Viktorovich, candidate of military sciences, senior researcher, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Shabunya Vladimir Valentinovich, candidate of technical sciences, senior researcher, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Sarafannikov Vitaly Semenovich, senior researcher, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Bilan Victoria Viktorovna, junior researcher, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Ivanov Denis Alexandrovich, candidate of technical Sciences, teacher, prosto_deniss@mail.ru, Russia, Chelyabinsk, Branch of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin

УДК 621.86:69
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-331-332

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

А.С. Коростин

Подъемно-транспортные машины являются незаменимым компонентом и оборудованием в современном строительстве, которое играет важную роль в выполнении различных задач, связанных с подъемом и перемещением грузов на строительных площадках, а также обеспечении доступа к труднодоступным местам. В данной статье рассматривается один из типов подъемно-транспортных машин, а именно гидравлический подъемник на автомобильной базе и его основные преимущества и применение в строительстве. Они выполняют большой спектр работ по монтажу, демонтажу, реконструкции и пр. Данная работа целиков посвящена анализу автовышек, а точнее автоматических гидравлических подъемников на колесной базе. Оцениваются конструктивные особенности оборудования, а также в этой работе приводятся основные правила и рекомендации по безопасной работе с представленным видом подъемно-транспортного оборудования. В заключении делаются выводы о возможностях и необходимости использования рассматриваемого вида оборудования в современной промышленности.

Ключевые слова: анализ оборудования, строительная техника, подъемно-транспортное оборудование, конструктивные особенности, автоматические гидравлические подъемники.

Подъемно-транспортные машины являются незаменимым компонентом и оборудованием в современном строительстве, которое играет важную роль в выполнении различных задач, связанных с подъемом и перемещением грузов на строительных площадках, а также обеспечении доступа к труднодоступным местам [1-6]. Автовышка (автогидроподъемник) — техника, применяемая для выполнения строительных работ на высоте. В зависимости от характера и объема работ, используют автовышки с разными характеристиками (тип и длина стрелы, конструкция площадки). Отделка фасадов (расшивка швов, оштукатуривание, окрашивание, облицовка плиткой), теплоизоляционные работы, монтаж модульных зданий, металлоконструкций, осветительного оборудования, обслуживание электросетей, ремонт мостов, кровельные работы — с помощью автовышки все эти операции можно выполнить.

Наиболее распространены автогидроподъемники с длиной стрелы до 25 метров (что приблизительно соответствует уровню восьмого этажа), однако существуют и такие модели, которые позволяют вести работы на высоте до 75 метров.

При эксплуатации этого оборудования нужно учитывать не только объем и характер работ, но и наличие свободного пространства рядом с объектом. Автовышки с коленчатой стрелой удобны тем, что позволяют приблизить рабочую платформу (люльку) к труднодоступным местам (например, внутренним углам или коньку кровли), однако большинство коленчатых подъемников предназначены для работ на высоте до 20 метров. Телескопическая стрела длиннее, но габариты автомобиля требуют удобного подъезда к объекту. Комбинированные автовышки (коленчато-телескопические) наиболее маневренны и подходят для применения в ограниченном пространстве.

Как и любой другой вид техники, вышка на колесном шасси грузового автомобиля требует строгого соблюдения определенных правил эксплуатации. Неправильное применение автовышки или допущение к работе необученного персонала без страховочных средств и достаточного уровня профессиональной квалификации может стать причиной несчастных случаев. Именно поэтому очень важно соблюдать технику безопасности.

Так водитель автовышки, а также рабочие, которых он поднимает внутри люльки, должны пройти соответствующие курсы и инструктаж, обучающие навыкам и правилам эксплуатации такого подъемного оборудования. От оператора автовышки требуется знание принципов управления, значений ограничения скорости и предельных нагрузок. Рабочие обязаны соблюдать правила техники безопасности на высоте, а также носить и пристегивать страховку.

Перед началом работы с автомобильной вышкой проводится обязательный осмотр исправности оборудования. Оператор спецтехники проверяет корректность работы всех электрических и механических систем, а также средств, обеспечивающих безопасную эксплуатацию автовышки. Так же зона в радиусе действия машины освобождается от посторонних людей. Участок проведения работ необходимо отмечать с помощью сигнальных лент или переносных ограждений.

Безопасность при работе с автовышкой зависит не только от исправного состояния оборудования, но и от правильности его использования [7-8]. Поэтому очень важно знать и соблюдать правила, пренебрежение которыми может быть опасно для оператора или для людей, находящихся внутри люльки [9-10]. Требования безопасной эксплуатации автомобильной вышки:

- не допускается работа без выносных опор, обеспечивающих устойчивость, при этом основание, на котором стоит автовышка, должно быть ровным и твердым;
- перемещаться между объектами можно только в состоянии, когда стрела находится в полностью опущенном и сложенном транспортировочном положении, а в люльке нет людей;
- при оставлении техники без присмотра необходимо извлечь из нее ключи зажигания и заблокировать подъемник от несанкционированного применения посторонними.

Важным фактором безопасной эксплуатации любой спецтехники является ежедневное проведение осмотра перед началом работ и своевременное прохождение технического обслуживания. Использование неисправной спецтехники запрещено – эксплуатация должна быть прекращена до момента устранения проблемы, чтобы не вызывать преждевременный износ узлов или аварийные ситуации, а также не спровоцировать получение травм и не создать опасные условия для труда персонала.

Сотрудники, поднимаемые с материалами и инструментом внутри люльки на высоту, должны быть пристегнуты с помощью специальной страховочной системы, задача которой – предотвратить случайное падение, способное привести к получению серьезных травм. Планируя работу автовышки, обязательно учитываются погодные условия – если надвигается сильный ветер, туман, снегопад или гроза, эксплуатацию спецтехники необходимо отложить до появления иной метеосводки.

Подвижная основа, на которую установлен поворотно-подъемный механизм с люлькой для людей, инструментов и материалов - чаще всего это грузовой автомобиль повышенной проходимости. Предназначение шасси – опорная часть, а также транспортировка вышки к месту проведения работ. Наличие двух или более пар колес обеспечивает хорошую маневренность в тесных условиях городских улиц, а мощный мотор делает такую технику пригодной для эксплуатации в условиях сельской местности и бездорожья. Во время осуществления работ на высоте, когда подъемный механизм приводится в разложенное состояние, из шасси выдвигаются опоры. Они обеспечивают повышенную устойчивость машины с грузом, исключая ее случайную потерю устойчивости.

Чтобы создать безопасные условия работы, подъемник оснащен механизмом блокировки, фиксирующим люльку на высоте в необходимом для выполнения тех или иных операций неподвижном положении. Стрела автовышки состоит из нескольких секций, количество которых зависит от максимальной высоты подъема. В зависимости от этой характеристики подъемника все автовышки можно поделить на три основные разновидности – маловысотные до 17 метров, средневысотные от 17 до 30 метров, и высотные с высотой подъема более 30 метров.

В самой верхней части стрелы гидравлического подъемника, установленного на шасси грузовика, находится платформа с ограждениями, также называемая люлькой. Она предназначена для безопасного размещения одного или нескольких рабочих, а также необходимых материалов и инструментов. Стандартная грузоподъемность люльки автовышки составляет 300 кг. Наличие перил позволяет закреплять страховочный пояс для выполнения ремонтно-монтажных работ на высоте, а также снижает риски случайного падения.

Одной из особенностей люльки автовышки является наличие полной изоляции от корпуса автомобиля. Она внедрена практически во все современные модели по той причине, что данный вид спецтехники часто используется совместно с различным электрооборудованием. Изоляция позволяет не беспокоиться о неожиданном получении электрических травм.

В заключение, подъемно-транспортные машины являются неотъемлемой частью строительной отрасли. Они обеспечивают быстроту и эффективность выполнения различных задач, связанных с подъемом и перемещением грузов и персонала. Благодаря такому оборудованию можно улучшить процесс строительства, обеспечить безопасность работников и выполнить задачи на больших высотах. Все это делает подъемно-транспортные машины незаменимыми инструментами в современном строительстве.

Список литературы

1. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины. М.: Машиностроение, 1984. 336 с.
2. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982. 543 с.

3. Коростин А.С. Аналитическое сравнение подъемно-транспортных машин в строительстве и их расчет // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 10. С. 73-75.
4. Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины строительной промышленности: Атлас конструкций: Учебное пособие для технических вузов / А.А. Вайнсон. М.: Альянс, 2014. 150 с.
5. Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. М.: Машиностроение, 1964. 336 с.
6. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1985. 520 с.
7. Кукин П.П. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств (Охрана труда) / П.П. Кукин, В.Л. Лапин. М.: Высшая школа, 2009. 335 с.
8. Пчелинцев В.А. Охрана труда в строительстве: учебник для вузов. / В.А. Пчелинцев, Д.В. Коптев, Г.Г. Орлов. М.: Альянс, 2016. 272 с.
9. Коптев Д.В. Охрана труда в строительстве: Учебное пособие для вузов. / Д.В. Коптев, В.И. Виноградов Д.В. Булыгин. М.: Альянс, 2016. 510 с.
10. Фролов А.В. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда в строительстве: Учебное пособие / А.В. Фролов, В.А. Лепихова, Н.В. Ляшенко. Рн/Д: Феникс, 2010. 704 с.

Коростин Александр Сергеевич, студент, korostin.alexander@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF THE USE OF LIFTING AND TRANSPORTING MACHINERY IN THE CONSTRUCTION FIELD

A.S. Korostin

Lifting and transport machines are an indispensable component and equipment in modern construction, which plays an important role in performing various tasks related to lifting and moving loads on construction sites, as well as providing access to hard-to-reach places. This article discusses one of the types of lifting and transport machines, namely a hydraulic lift on an automobile base and its main advantages, and application in construction, and perform a wide range of work on installation, dismantling, reconstruction, etc. This work is entirely devoted to the analysis of aerial platforms, or rather automatic hydraulic lifts on a wheel base. The design features of the equipment are assessed, and this work also provides basic rules and recommendations for safe work with the presented type of handling equipment. In conclusion, conclusions are drawn about the possibilities and necessity of using the type of equipment under consideration.

Key words: equipment analysis, construction equipment, lifting and transport equipment, design features, automatic hydraulic lifts.

Korostin Alexander Sergeevich, student, korostin.alexander@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 004.891.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-333-334

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭМОЦИОНАЛЬНОГО ОКРАСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ТЕКСТОВ

П.А. Савенков, А.Н. Ивутин

Целью исследования является обзор современных методов для решения задачи определения эмоционального окраса текстов на естественном языке, набираемых на мобильных устройствах пользователями в процессе естественного взаимодействия с ними. В работе рассматриваются подходы к проведению данного вида анализа их достоинства и недостатки применения.

Ключевые слова: анализ естественного языка, машинное обучение, большие данные, анализ тональности, эмоциональный окрас, мобильный контроль.

Одной из стремительно развивающихся областей в искусственном интеллекте и машинном обучении является обработка естественного языка (NLP – Natural Language Processing), включающая в себя инструменты анализа тональности. Анализ тональности текста – это процесс его обработки на естественном языке с целью выявления закономерностей и извлечения новых знаний [1]. Основной задачей в анализе тональности является классификация полярности текста. В качестве объектов анализа могут выступать события, процессы или же реальные объекты. Анализ эмоционального окраса текста имеет широкий спектр применения. На его основе становится возможным построение рекомендательных и обучающих систем [2]. Оценка эмоционального окраса текстов, набираемых на мобильных устройствах пользователями при их естественном взаимодействии с устройством, так же не является исключением, однако имеет ряд ограничений, связанных со спецификой вводимых на мобильных устройствах текстов (большое количество шума, низкая информативность данных, отсутствие прямых способов выборки текстов). Дополнительно встречаются противоположные оценки, поэтому целесообразно оценивать отдельные короткие предложения, а не весь текст, выбранный за определенный временной промежуток [3, 4].

Также, при обработке текстов на естественном языке, а именно оценке их эмоционального окраса могут возникнуть следующие сложности:

1. Сарказм – является распространенной проблемой, заключающейся в некорректной интерпретации слов и предложений;

2. Ложно-нейтральные настроения. При анализе длинных предложений возможно возникновение ложно нейтральных результирующих значений. Для избегания данной ситуации следует делить предложения по конкретным темам, что позволит более подробно и корректно выявлять окрас конкретного фрагмента без получения ложно-нейтральных результатов анализа;

3. При смешанных или многомерных настроениях внутри одного предложения возможно появление как позитивного, так и отрицательного окраса;

4. Неоднозначность негативных слов. Данная проблема требует проведения разбора контекста использования данного слова в тексте.

Не смотря на данные сложности, решение задачи анализа эмоционального окраса пользовательских текстов, набираемых на мобильных устройствах пользователями, остается возможным, хоть и требует проведения специфической предобработки текста и использования специальных наборов для обучения соответствующих определенной предметной области и в основном осуществляется на основе методов машинного обучения.

Для решения данной задачи, может применяться как бинарная классификация (выявление на основе текстов положительных и отрицательных оттенков в них). Однако количество классов может быть расширено. Таким образом, оценка может включать в себя не только валентность, но и интенсивность высказывания [5, 6].

В настоящее время используются следующие подходы для выявления эмоциональной окраски текста:

1) Лингвистический. Данный подход основан на использовании словарей с заранее сформированными шаблонами. При данном подходе используются тональные словари, представляющие собой список слов со значением тональности, например, SentiWordNet, RuSentiLex, WordNetAffect, SenticNet, LinisCrowd, RuSentiment, Kaggle Russian News Dataset, RuReviews [7]. При использовании данного подхода в тексте ищутся пересечения со словарем, после чего на основе суммы оценок найденных пересечений определяется тональность заданного текста. Данный подход демонстрирует качественные результаты в некоторых областях. Недостатком данного подхода является высокая сложность подготовки словаря, что требует детального знания предметной области, для которой он составляется. Также недостатком является и низкая масштабируемость, по причине которой невозможно использование одного и того же словаря для разных предметных областей, где одинаковые термины могут вносить разный вес в степень эмоционального окраса.

2) Подход, основанный на использовании методов машинного обучения, заключается в том, что вначале на заранее размеченных данных происходит обучение классификатора, который в дальнейшем используется для классификации новых текстов [8].

3) Гибридный подход, сочетающий в себе правила на основе словарей и машинного обучения. Ряд исследований показывает, что с применение гибридного подхода позволяет добиться повышения качества классификации, однако такой подход является самым трудоемким и затратным по времени.

Подход, основанный на использовании машинного обучения, является наиболее рациональным и наименее трудоемким для решения задачи анализа текста и может быть использован для оценки эмоционального окраса пользовательских текстов, формируемых при естественном взаимодействии пользователя с мобильным устройством.

Данный подход может использовать следующие варианты реализации:

Сверточные нейронные сети (CNN). Изначально сверточные сети использовались в основном для распознавания изображений, однако, как только доказали свою эффективность в области компьютерного зрения, их начали применять и для решения задач классификации текстов. В сверточных нейронных сетях используется операция свертки, когда каждый фрагмент данных умножается на матрицу (ядро) свертки поэлементно, после чего результат суммируется и записывается в аналогичную позицию выходных данных. Поскольку свертки происходят на соседних словах, модель может уловить отрицания или n-граммы, которые несут новую информацию о настроении. Сверточные сети могут демонстрировать высокие результаты при анализе тональности текста, превосходя другие алгоритмы на некоторых тестах [9].

Рекуррентные нейронные сети (RNN) широко распространены в задачах обработки текста, в том числе и для анализа тональности. Особенности рекуррентных нейронных сетей заключается в наличии обратных связей. Значение весов сети зависит как от текущих, так и от предыдущих входных данных, благодаря чему вес каждого слова зависит от веса остальных слов в предложения [10].

Простую рекуррентную нейронную сеть (1) можно представить в следующем виде:

$$h^{(t)}= f(x^{(t)},h^{(t-1)}),\ y^{(t)}= g(h^{(t)}) \quad (1)$$

где $x^{(t)}$ – входной вектор; t - момент времени; $h^{(t)}$– параметры скрытого нейрона; $y^{(t)}$ – выход.

LSTM (Long ShortTerm Memory – длительная краткосрочная память) и GRU (Gated Recurrent Unit – управляемые рекуррентные нейроны) являются улучшенной реализацией рекуррентных нейронных сетей, решающей проблему исчезающего градиента, которой подвержены любые рекуррентные нейронные сети и показывают наилучшие результаты, однако процедура их обучения достаточно трудоемка [11].

Рекуррентные нейронные сети, использующие подход LSTM, обладают усовершенствованным способом вычисления параметров скрытого слоя $h^{(t)}$. Этот метод, кроме входных данных и прошлого состояния сети, использует фильтры (gates), определяющие использование информации для вычисления выходных значений текущего слоя $y^{(t)}$, и значений скрытого слоя следующего шага $h^{(t+1)}$. Основным элементом LSTM слоя является запоминающий блок, рассчитываемый на каждой итерации, с использованием текущих входных значений $x^{(t)}$ и значений блока на прошлой итерации $c^{(t-1)}$. Результирующее значение LSTM-слоя (2) определяется выходным фильтром и нелинейной трансформацией над параметрами запоминающего блока.

$$h^{(t)}= o^{(t)} \circ \tanh(c^{(t)}) \quad (2)$$

В 2014 году представили модель GRU (Gated Recurrent Unit), схожую с LSTM, но использующую меньше фильтров и операций для вычисления $h^{(t)}$.

В ходе исследования получено, что при обработке текстов на естественном языке, а именно оценке их эмоционального окраса могут возникнуть трудности, связанные с возможной двойственной интерпретацией слов, что требует анализа текста относительно используемого контекста.

Установлено, что основными подходами определения эмоционального окраса текста являются лингвистический подход, подход, основанный на методах машинного обучения и гибридный. Рассмотрены варианты реализации решений для анализа эмоционального окраса на основе сверточных и рекуррентных нейронных сетей, их достоинства, недостатки и применимость.

Таким образом в результате проведения исследования получено, что не смотря на рассмотренные особенности, решение задачи анализа эмоционального окраса пользовательских текстов, набираемых на мобильных устройствах пользователями, остается возможным и доступным, однако требует специфической предобработки текстов и выбора метода анализа для конкретной области и определенного подхода в реализации.

Список литературы

1. Chowdhary K.R., Chowdhary K.R. Natural language processing //Fundamentals of artificial intelligence. – 2020. – С. 603-649.
2. Панфилов А. В., Дерюшев В. В., Короткий А. А. Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода //Безопасность труда в промышленности. 2020. Т. 5. С. 48-55.
3. Gamon M., et al. Pulse: Mining Customer Opinions from Free Text // Proceedings of the 6th International Symposium on Intelligent Data Analysis (IDA). 2005. P.121–132.
4. Wiebe J., Bruce R., O'Hara T. Development and use of a gold-standard data set for subjectivity classifications // Proceedings of the 37th annual meeting of the Association for Computational Linguistics on Computational Linguistics. 1999. P. 246–253.
5. Ng R., Pauls A. Multi-document summarization of evaluative text // Proceedings of the 11st Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics. 2006. P.305– 312.
6. Carenini G., Ng R. Zwart E. Extracting knowledge from evaluative text // Proceedings of the 3rd international conference on Knowledge capture. 2005. P.11–18.
7. Двойникова А. А., Карпов А. А. Аналитический обзор подходов к распознаванию тональности русскоязычных текстовых данных //Информационно-управляющие системы. 2020. №. 4 (107). С. 20-30.
8. Котельников Е. В., Клековкина М. В. Автоматический анализ тональности текстов на основе методов машинного обучения //Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. 2012. Т. 2. №. 11. С. 27.
9. Ахметгалиев А. И., Гафаров Ф. М., Ситдикова Ф. Б. Анализ тональности текстов с использованием нейросетевых моделей //Наука России: Цели и задачи. 2019. С. 33-40.
10. Пескишева Т. А. Методы анализа тональности текстов на естественном языке //Общество. Наука. Инновации (НПК-2017). 2017. С. 1730-1742.
11. Li D., Qian J. Text sentiment analysis based on long short-term memory // 2016 First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI). IEEE, 2016. С. 471-475.

Савенков Павел Анатольевич, старший преподаватель, pavel@savenkov.net, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ивутин Алексей Николаевич, д-р. техн. наук, профессор, alexey.ivutin@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

RESEARCH OF METHODS FOR ANALYSIS OF THE EMOTIONAL COLOR OF USER TEXTS

P.A. Savenkov, A.N. Ivutin

The purpose of the study is to review modern methods for solving the problem of determining the emotional color of texts in natural language, typed on mobile devices by users in the process of natural interaction with them. The paper discusses approaches to conducting this type of analysis, their advantages and disadvantages of application.

Key words: natural language analysis, machine learning, big data, sentiment analysis, emotional coloring, mobile control.

Savenkov Pavel Anatolyevich, senior lecturer, pavel@savenkov.net, Russia, Tula, Tula State University,

Ivutin Alexey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, alexey.ivutin@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 623.455.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-336-337

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСТРЕЛОВ ИЗ СПЛАВА АМГ5

В.А. Лобов, Е.О. Фролова

В ходе работы был проведен анализ применения алюминиевого сплава в качестве гильзового материала, выполнены прочностные расчеты гильзы из сплава АМг5. Рассчитан конечный зазор, выполнены расчеты прочности корпуса на продольный и поперечный разрыв, а также усилие защемления при экстракции. Разработан технологический процесс изготовления гильзы из алюминиевого сплава АМг5, проведена экспериментальная отработка технологии изготовления, в результате чего были разработаны рекомендации по совершенствованию технологического процесса на основе полученных результатов.

Ключевые слова: Гильза, алюминий, прочность, штамповка, вытяжка, штамп.

В настоящее время стальные гильзы являются одними из основных для снаряжения и производства патронов и малокалиберных артиллерийских боеприпасов. Однако, современные тенденции введения боя и участие в вооружённых конфликтах показывают стремление к увеличению переносимого боекомплекта. Для облегчения и уменьшения его веса рассматривалось множество вариантов. Одним из них является изготовление гильз из алюминиевых сплавов, что позволит при той же массе количественно увеличить боезапас [1].

Вопрос о снижении массы наиболее актуален в авиации [2], где возможность взять на борт большее число снарядов может сыграть решающую роль при выполнении различных задач. Примером может служить американская 30-мм автоматическая пушка GAU-8 созданная параллельно штурмовику А-10. В Российской военной авиации широко распространены пушки моделей ГШ-301, ГШ-30, ГШ-30К, ГШ-6-30 устанавливаемые на вертолеты Ми-24П, штурмовики Су-25, Су-39, истребители МиГ-29, МиГ-35, Су-27, Су-30, Су-33, Су-35 и фронтовые бомбардировщики Су-34.

В качестве материала для изготовления гильз к патронам GAU-8 использован алюминий вместо привычной стали, за счет чего удалось увеличить переносимый боезапас примерно на 30% при заданной массе в связи с меньшей плотностью используемого металла. Такие снаряды имеют пластмассовые ведущие пояски с целью продления срока службы ствола. Также американскими инженерами было решено использовать специальных низкомолекулярный метательный заряд с меньшей температурой горения: 2200 К против 3500 К, выдававшим такой же импульс.

Однако продолжительная стрельба невозможна из-за перегрева и действия при этом алюминиевых материалов по отношению к рабочим элементам орудия. Поэтому, при ведении огня из такой пушки, необходимы минутные перерывы после двух секундного залпа с целью нормального охлаждения блока стволов.

В Советском Союзе в 1962 году ЦНИИТОЧМАШ сделали опытную партию патронов клб. 7,62×39 мм с гильзой из алюминиевого сплава. Данные гильзы получили шифр ГА, а их наружная поверхность имела антифрикционное графитовое покрытие, чтобы при больших температурах частички алюминия не оставались на поверхности деталей устройства автоматики. Однако, при дальнейших испытаниях выяснилось, что срок хранения таких патронов слишком мал, и поэтому разработки гильз под данный калибр были прекращены.

В ходе различных испытаний установлено, что алюминий обладает свойством самовоспламенения на воздухе в процессе экстракции при температуре нагрева около 400°С, тем самым его использование в производстве патронов для систем с темпом стрельбы более 200 выстрелов в минуту некорректно. Однако такой фактор возможно уменьшить или вовсе устранить путем внедрения полимерного покрытия, защищавшего алюминий от возгорания, но тогда необходимо увеличение линейных размеров.

Также проблему самовоспламенения можно решить покрытие гильзы тонким слоем меди или латуни по технологии электролиза. Например, технология, описанная в работе [3] включает нанесение медного покрытия в электролите содержащем: $CuSO_45H_2O$ – 45-55 г/л; $Na_4P_2O_710H_2O$ – 200-240 г/л; KNO_2 – 10-15 г/л при температуре 55-65 °С в две стадии за суммарное время 5-6 мин, что позволит применять способ в автоматических роторных и роторно-конвейерных линиях.

Именно поэтому алюминиевые гильзы получили распространение лишь в изготовлении патронов для пистолетов, где скорости стрельбы и температуры намного меньше, примером которых служит патрон 9×18 мм ПМ, 9×19 para, а также в различных патронах гражданского оружия. Положительным показателем является то, что стоимость пистолетного патрона с алюминиевой гильзой, относительно медной, ниже.

Несмотря на меньшую температуру плавления алюминия и его особенность к самовоспламенению при экстракции, а также растрескиванию в процессе долгого хранения сама идея разработки таких боеприпасов является перспективной и востребованной, так как позволит уменьшить вес боекомплекта, к чему стремятся конструкторы долгие годы.

Материал изготовления гильзы должен иметь достаточную прочность и пластичность. Легирующие элементы в составе алюминия (магний, никель и др.) содержанием не более 5% обеспечивают значения механических свойств, сопоставимые с латунью и сталью. Для обоснования марки материала был проанализирован опыт использования алюминия среди боеприпасов выпускаемых Российскими предприятиями: травматического пистолета «Оса», гильзы выстрела «Балкан» и гильзы опытного образца 1962 года, выполнен химический анализ перечисленных образцов на анализаторе «FOUNDRY-MASTER Smart». В соответствии с ГОСТ 4784-97 материалами являются сплавы АМг 2, Д16 и АМг 6 соответственно (табл. 1).

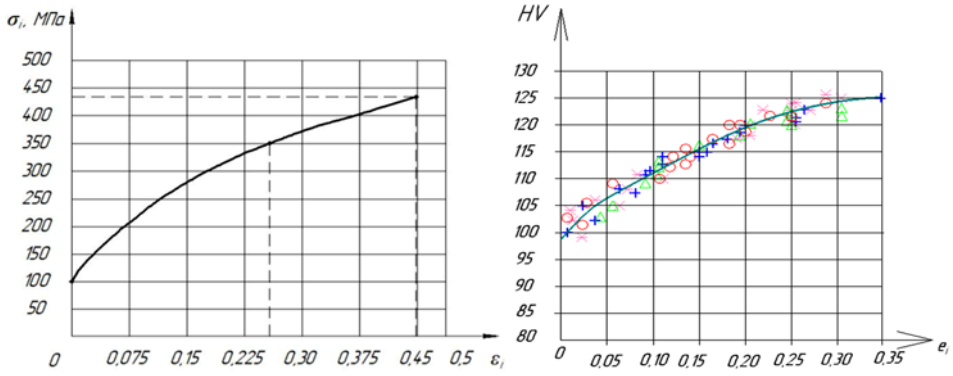
Таблица 1

Результаты химического анализа и их соответствие ГОСТ 4784-97

Массовая доля элементов,%	«Оса»	АМг2 по ГОСТ	«Балкан»	Д16 по ГОСТ	Образец 1962 г.	АМг6 по ГОСТ	АМг5 ГОСТ
Алюминий	97,20	96,7-95,4	93,63	93,55-92	92,55	92,58-91,2	93,55-92
Кремний	0,104	0,4	0,19	0,5	0,131	0,4	0,5
Железо	0,161	0,5	0,16	0,5	0,159	0,4	0,5
Медь	0,0901	0,15	4,1	3,8-4,5	0,0253	0,1	0,1
Марганец	0,309	0,1-0,6	0,55	0,3-0,7	0,206	0,5-0,8	0,3-0,8
Магний	2,01	1,8-2,6	1,31	1,2-1,6	6,79	5,8-6,8	4,8-5,8
Цинк	0,0269	0,15	0,04	0,1	0,0217	0,2	0,2
Хром	0,0026	0,05	-	-	<0,001	-	-
Титан	0,0412	0,15	0,02	0,1	0,0518	0,02-0,1	0,02-0,1

Для отработки технологии выбран сплав АМг 5 с уменьшенным содержанием магния по сравнению с АМг 6, достаточно высокой твердостью и пластичностью. Были проведены механические испытания растяжением плоских образцов на испытательной машине Shimadzu AG-X-1 и определены показатели прочности и пластичности, а также построена кривая деформационного упрочнения в координатах «интенсивность напряжений σ_i − интенсивность деформации ε_i», а также зависимость твердости по Виккерсу *HV* от степени деформации e_i (рис. 1).

На начальном этапе для изготовления алюминиевой гильзы выбран патрон соответствующий образцу 1962 г. в связи с широким распространением оружия под калибр 7,62 мм и имеющимся опытом изготовления облегченных гильз данного калибра. В последующем полученные результаты можно использовать в производстве артиллерийских гильз клб. 23 и 30 мм широко применяющихся в военной авиации.



а ***б***

Рис. 1. Кривая деформационного упрочнения (а) и зависимость твердости от степени деформации для сплава АМг 5

Для расчета конечного зазора, оценки продольной и поперечной прочности используется модель функционирования гильзы, в виде оболочки с дном, расположенной в соосной ей каморе − толстостенным цилиндре, ограниченным затвором (опорным узлом) [4]. Перед выстрелом между корпусом гильзы и каморой имеется начальный диаметральный зазор, а между ее дном и зеркалом – начальный осевой зазор. За счет варьирования основных факторов выстрела при проектировании гильзы (материал гильзы, его структура, механические и теплофизические свойства, давление пороховых газов, характер его нарастания, температура пороховых газов и др.), обеспечена ее надежная экстракция, прочность и обтюрация пороховых газов.

Для расчета конечного зазора Δ и усилия защемления гильзы определены сечения гильзы, в которых заданы необходимые значения предела текучести. Это середина дульца, граница корпуса и ската, сечение сопряжения цилиндрической части, дно гильзы. Расчет конечного зазора выполнен в специализированной программе «ZAZOR» (рис. 2). Исходными данными для расчета служат геометрические параметры гильзы и патронника, свойства материала гильзы и ствола, параметры температурного состояния гильзы, значения максимального давления и контактных условий.

Из полученного графика следует, что в придонной части гильзы происходит натяг с усилием защемления, не превышающем 50 кг, что обеспечивает штатное функционирование автоматики оружия. Падение силы защемления при смещении гильзы зависит от уменьшения натяга.

Под воздействием пороховых газов нижняя часть корпуса гильзы при выстреле испытывает значительную деформацию в осевом направлении вследствие «несвободного» выбора «зеркального» зазора и упругой осадки узла запирания [4]. Проверку прочности корпуса гильзы на возможность поперечного разрыва проводят для моментного участка. По результатам расчета получены графики распределения осевой деформации ε_z (рис. 3). Кривая

$\varepsilon_{z\ общ} = f(z)$ скорректирована так, чтобы максимальное значение осевой деформации $\varepsilon_{z\ max}$ совпало с устойчивой деформацией ε_y материала гильзы – алюминиевого сплава АМг5 в рассматриваемом сечении. Значение устойчивой деформации определено по зависимости [5] $\varepsilon_y = 0{,}11\varepsilon_{ip}$, где ε_{ip} – предельная до разрушения интенсивность деформации и составляет 4,3% (0,043), следовательно деформация не должна превышать эту величину, что подтверждается графиком.

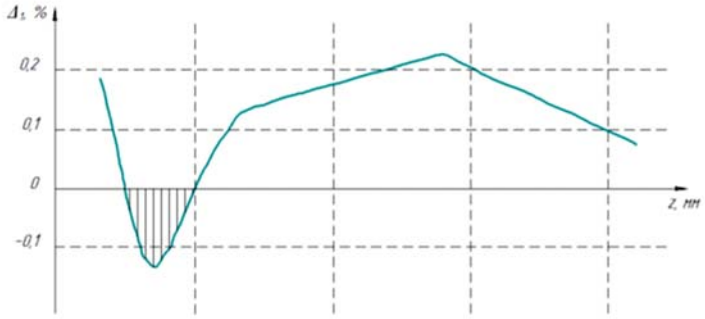


Рис. 2. График распределения значений конечного зазора

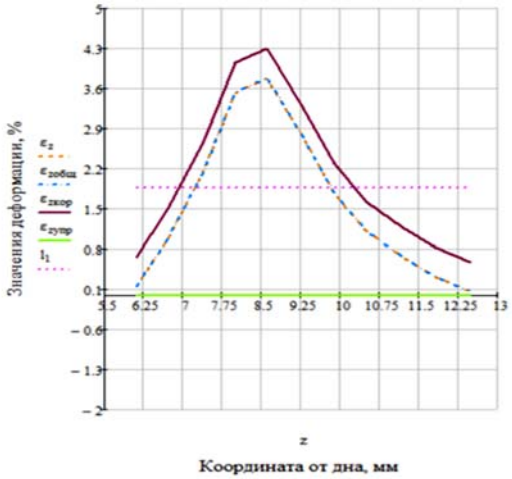


Рис. 3. Распределение деформации по сечениям

Образование продольных трещин на корпусе наиболее вероятно в начальный период функционирования гильзы при значительной разностенности корпуса, небольшом запасе пластичности материала корпуса, завышенном начальном зазоре Δ_0 [4]. Продольная прочность обеспечена, если выполняется условие $\varepsilon_{\theta\ max} \le \varepsilon_y$, где $\varepsilon_{\theta\ max}$ – максимальное значение тангенциальной деформации. Из построенного графика (рис. 4) видно, что в различных сечениях деформация не превышает предельно устойчивой равной 0,043.

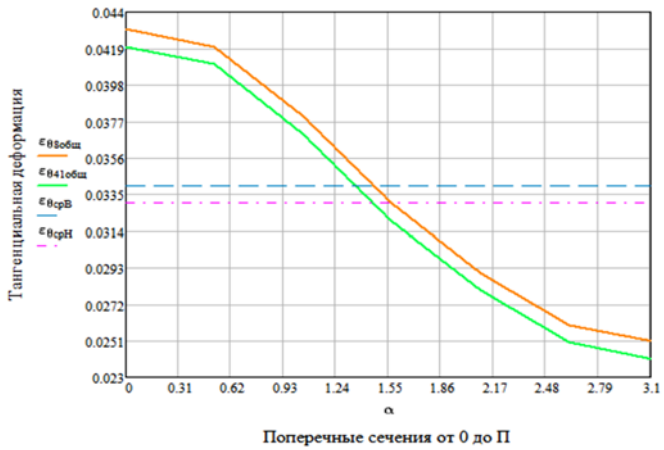


Рис. 4. График распределения тангенциальной деформации в расчетных сечениях корпуса гильзы

Таким образом, гильза из сплава АМг 5 при выстреле обеспечит необходимый натяг с усилием защемления (не более 50 кг), надежную обтюрацию пороховых газов и работу автоматики при экстракции. Расчеты показали достаточный запас прочности, что обеспечит отсутствие продольного и поперечного разрушения при функционировании патрона.

Штатная технология изготовления стальной гильзы включает операции вырубки кружка, свертки, четырех вытяжек с утонением, двух штамповок дна и двух обжимов. Для отработки начального этапа изготовления алюминиевой гильзы клб. 7,62 мм был проведен эксперимент, в ходе которого выполнялась операция вытяжки из плоской заготовки (свертки) на испытательной машине Shimadzu AG-X-1.

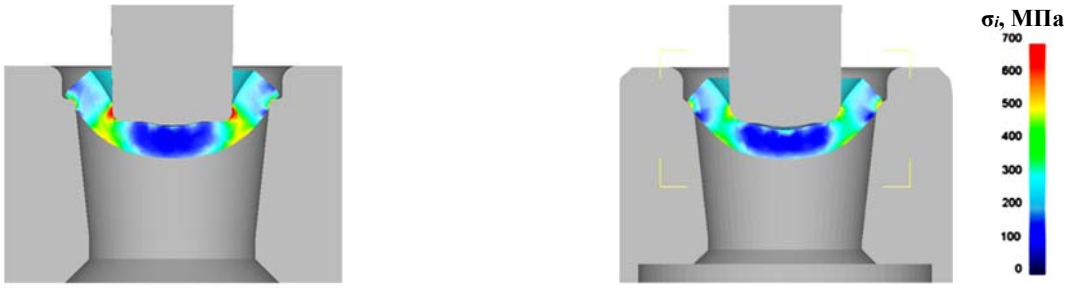
Рабочий инструмент свертки изготовлен по размерам, утвержденным штатной технологией изготовления стальной гильзы клб. 7,62 мм. Заготовка применялась диаметром D_0 = 20,8 мм и толщиной S_0 = 3,2 мм. Эксперимент проведен при скорости деформирования v = 10 мм/мин с использованием графитовой смазки. В ходе испытания произошел отрыв дна из-за низких показателей пластичности материала (рис. 5, *а*).

Проведенное компьютерное моделирование методом конечных элементов показало, что на участках радиусного сопряжения стенки с дном значение интенсивности напряжений превышает предельно допустимое для сплава АМг 5 (рис. 6, *а*). Поэтому решено увеличить радиусы скругления рабочего инструмента (рис. 6, *б*), что по результатам моделирования позволило снизить интенсивность напряжений в опасном сечении до допустимого значения. Однако деформированная заготовка также разрушилась, но на более поздней стадии (рис. 5, *б*).

а ***б***

Рис. 5. Результаты свертки гильзы из сплава АМг5 в заводском инструмента (а) и с увеличенными радиусами скругления (б)

Одним из путей устранения разрушения на вытяжках является увеличение количества операций, т.е. введение промежуточной вытяжки. Также, ее можно заменить подштамповкой по аналогии с производством артиллерийских гильз. Третий путь – применение фторорганических поверхностно-активных веществ, наносимых на поверхность твердого тела [6, 7]. В результате смазка лучше удерживается на поверхности, значительно снижается трение и формоизменение протекает с меньшей вероятностью потери устойчивости.



а ***б***

Рис. 6. Результаты распределения интенсивности напряжений на свертке в заводском инструмента (а) и с увеличенными радиусами скругления (б)

Результаты экспериментальной проверки формоизменения кружка с применением подштамповки, снижающей нагрузки на последующей свертке, позволили получить полый полуфабрикат без образования трещин подтвердив правильность принятых технических решений.

Несмотря на то, что все перечисленные методы снижают технологичность изготовления гильзы, существенным преимуществом алюминия является отсутствие окалинообразования при нагреве до температуры рекристаллизации. Соответственно возможно сокращение общего количества операций примерно в 1,5 раза за счет химической обработки, что значительно упростит технологию и уменьшит время на изготовление гильзы.

Выводы.

1. В результате анализа химического состава алюминиевых гильз, был выбран сплав АМг 5 (ГОСТ 4784-97) с уменьшенным содержанием магния в сравнении с АМг 6 и достаточно высокой твердостью в исходном состоянии для обеспечения распределения твердости в заданных сечениях гильзы.

2. Для оценки прочности корпуса гильзы при функционировании были проведены расчеты конечного зазора между гильзой и каморой, поперечной и продольной прочности корпуса гильзы. Гильза при выстреле обеспечит необходимый натяг с усилием защемления, не превышающим 50 кг; обтюрацию пороховых газов и работу автоматики. Прочностные расчеты гильзы показали, что при выстреле продольного и поперечного разрушения не произойдет.

3. Для отработки технологии изготовления алюминиевой гильзы клб. 7,62 мм был проведен эксперимент, в ходе которого для устранения разрушения на операции вытяжки из плоской заготовки было принято увеличить количество операций путем введения подштамповки.

4. Результаты экспериментального исследования можно распространить на производство авиационных боеприпасов клб. 23 и 30 мм.

Список литературы

1. Лобов В.А., Юрченко Н.М. Технологическое обоснование применения алюминиевых сплавов для изготовления гильз к патронам стрелкового оружия // Труды XI ОМНТК «Молодежь. Техника. Космос». Т.2. СПб.: БГТУ, 2019. С. 280-284.

2. Лобов В.А. Проектно-технологическое обоснование применения сплава АМг5 для гильз авиационного вооружения // Сборник аннотаций конкурсных работ XIII Всероссийского межотраслевого молодежного конкурса научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». М. Издательство Перо, 2021. С. 148-149.

3. Патент 2214483 РФ. Способ меднения алюминия / Ю.Я. Лукомский. Опубл. 20.10.2003. Бюл. №

4. Данилин Г.А., Огородников В.П., Заволокин А.Б. Основы проектирования патронов к стрелковому оружию; 3-е изд., испр. СПб.: БГТУ, 2017. 368 с.

5. Свердлов М.И. Основы проектирования орудийных гильз; Лен. мех. ин-т, 1962. 450 с.

6. Лобов В.А., Олехвер А.И., Ремшев Е.Ю. Разработка технологии изготовления тонкостенных дисковых электродов для резонансных разрядников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 11. Ч.1. С. 119−125.

7. Патент 2384600 РФ. Антифрикционная композиция, обладающая антиадгезионными и антикоррозийными свойствами, способ получения антифрикционного покрытия и применение композиции / А.В. Белов, О.Г. Агошков, К.А. Путиев, В.И. Ольховка, Л.А. Семенычева, И.А. Губарева Опубл. 20.03.2010. Бюл. №8.

Лобов Василий Александрович, канд., техн., наук доцент, vasilijlobov99130@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

Фролова Екатерина Олеговна, ассистент, katerinafrolova1996@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

MANUFACTURING METAL ELEMENTS OF SHOT FROM AMG5 ALLOY

V.A. Lobov, E.O. Frolova

In the course of the work, an analysis of the use of aluminum alloy as a liner material was carried out, and strength calculations were performed for a liner made of AMg5 alloy. The final gap was calculated, the strength of the body against longitudinal and transverse rupture was calculated, as well as the pinch force during extraction. A technological process for manufacturing a sleeve from aluminum alloy AMg5 was developed, experimental testing of the manufacturing technology was carried out, as a result of which recommendations were developed for improving the technological process based on the results obtained.

Key words: Sleeve, aluminum, strength, stamping, drawing, stamp.

Lobov Vasiliy Aleksandrovich, candidate of technical science, docent, vasilijlobov99130@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,

Frolova Ekaterina Olegovna, assistant, katerinafrolova1996@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov

УДК 621.983; 539.974
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-340-341

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ПОКОВКИ ДЕТАЛИ «ПАЛЕЦ ШАРОВОЙ»

П.В. Романов, А.В. Харченко

В статье рассмотрены вопросы компьютерного моделирования процесса объемного деформирования предварительно вальцованной заготовки с целью получения поковки детали «Палей шаровой». Предварительная вальцовка цилиндрических заготовок применяется для придания оптимальной формы и перераспределения металла в осевом направлении. Оптимизированная заготовка способствует минимизации потерь металла, расходуемого на облой в открытых штампах. Проведенное моделирование позволило выявить влияние технологических параметров процесса, условий трения, высоты облойной канавки на напряженно-деформированное состояние поковки, силовые режимы операции. Показаны основные преимущества и недостатки предлагаемой технологической схемы.

Ключевые слова: открытая штамповка, силовые режимы, поковка, интенсивность напряжений, интенсивность деформаций.

Неотъемной частью любого автомобиля являются шаровые шарниры, используемые в подвеске и рулевом управлении. В связи с этим, к таким элементам предъявляются повышенные требования по прочности и износостойкости, т.к. они напрямую влияют на безопасную эксплуатацию транспортных средств. Как правило, для заготовок используются высококачественные конструкционные стали, позволяющие эксплуатировать данные узлы при высоких статических и ударных нагрузках. Использование технологии объемной штамповки способствует формированию оптимальной микроструктуры в теле поковки. Конструкция шаровой опоры и «палец шаровой» приведены на рис. 1.

Данная деталь может иметь различные типоразмеры и габариты. Основным способом получения деталей типа «палец шаровой» является получение поковок объемной штамповкой в открытых штампах из предварительно вальцованных заготовок с их последующей механической обработкой. При использовании открытой штамповки облой гарантирует заполнение полости штампа, но являясь технологической необходимостью, он одновременно увеличивает потери металла в отход, силу деформирования и требует введения дополнительной операции обрезки облоя. Способ штамповки в закрытых штампах (безоблойной штамповки) более экономичен, так как позволяет получить поковку с минимальной последующей обработкой резанием, но при изготовлении поковок типа «палец шаровой», как правило, не применяется, т.к. данное изделие имеет сложную конфигурацию [1-12].

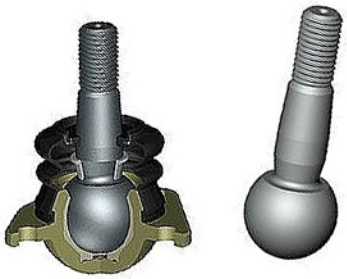


Рис. 1. Схема устройства шаровой опоры (а) и «палец шаровой» (б)

В данной работе рассмотрена операция формоизменения удлиненной в плане детали «палец шаровой». В связи со сложной конфигурацией поковки и большим отходом металла в облой при открытой штамповке, наиболее целесообразно использовать предварительное профилирование цилиндрических заготовок в вальцовочных штампах. Данный способ подразумевает перераспределение материала вдоль оси заготовки с изменением площадей поперечных сечений. Далее вальцованная заготовка пластически деформируется с применением кривошипного горячештамповочного пресса.

Заготовка выполнена из стали 40Х, эскиз детали приведен на рис. 1. Параметры процесса: температура заготовки 1250 $^{\circ}C$; температура инструмента 20 $^{\circ}C$; трение варьировалось в диапазоне 0,15…0,3; высота облойной канавки 1…3 мм при номинальном расчетном значении 2 мм. Схема для моделирования процесса объемной штамповки показана на рис. 2.

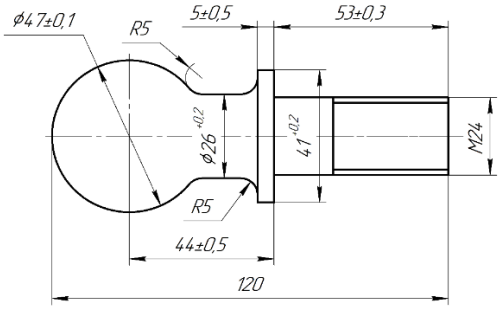


Рис. 1. Эскиз детали «Палец шаровой»

Традиционная технологический процесс изготовления таких поковок включает в себя предварительное профилирование заготовок с применением ковочных вальцов, формообразование на кривошипных прессах за несколько переходов в открытых или закрытых штампах, последующие отделочные операции в виде обрезки облоя и очистки поковки от окалины. Проведем компьютерное моделирование процесса формообразования поковки «Палец шаровой» в программном комплексе QForm с целью определения правильности проектирования технологических переходов, выбора оптимальных размеров заготовки и инструмента.

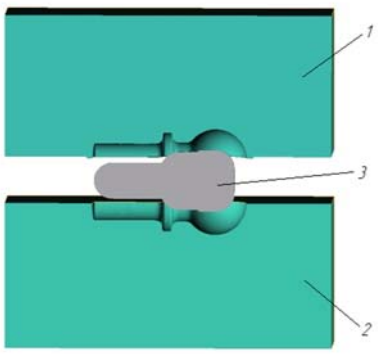
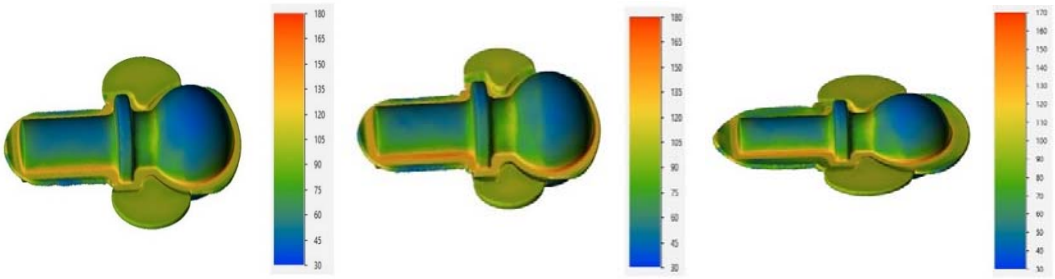


Рис. 2. Схема штамповки детали «Палец шаровой» из предварительно профилированной заготовки: 1 – верхняя вставка; 2 – нижняя вставка; 3 - заготовка

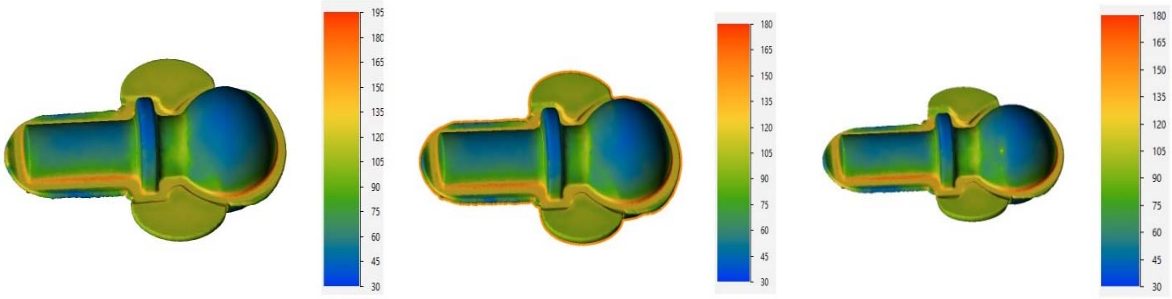
На рис. 3. показано распределение интенсивности напряжений в поковке при их деформации в ручье штампа с высотой облойной канавки, изменяющейся от 1 до 3 мм и коэффициентом трения 0,15…0,3.

Анализ картины распределения величины интенсивности напряжений в теле поковки показывает, что с ростом коэффициента трения от 0,15 до 0,3 происходит увеличение интенсивности напряжений на 5…10%. Изменение высоты облойной канавки в диапазоне от 1 до 3 мм приводит к уменьшению интенсивности напряжений на 3…5%. Наибольшая величина высоты мостика облойной канавки не приводит к возникновению объемных дефектов в поковке.



а *б* *в*

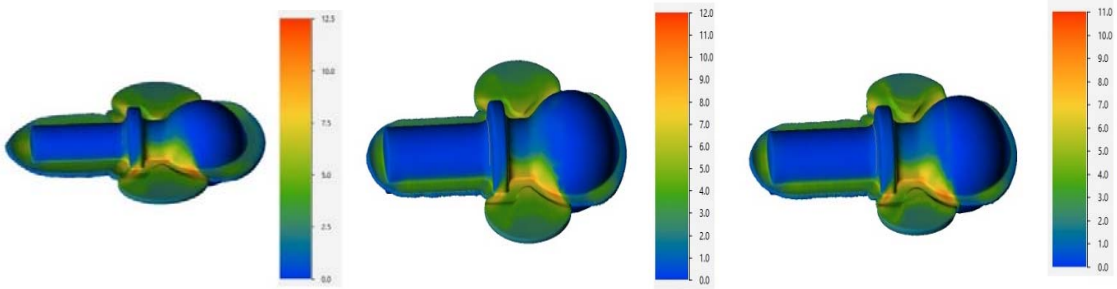
Рис. 3. Интенсивность напряжений в поковках при их деформировании в ручье штампа с разной высотой облойной канавки: а – 1 мм; б –2 мм; в – 3 мм (коэффициент трения 0,15)



а *б* *в*

Рис. 4. Интенсивность напряжений в поковках при их деформировании в ручье штампа с разной высотой облойной канавки: а – 1 мм; б –2 мм; в – 3 мм (коэффициент трения 0,3)

На рисунке 5 приведены графические зависимости распределения величины интенсивности деформации по объему полуфабриката на заключительной стадии штамповки в зависимости от высоты мостика облойной канавки при фиксированном коэффициенте трения между материалом заготовки и инструмента.



а *б* *в*

Рис. 5. Интенсивность деформации в поковках при их деформировании в ручье штампа с разной высотой мостика облойной канавки: а – 1 мм; б –2 мм; в – 3 мм (коэффициент трения 0,15)

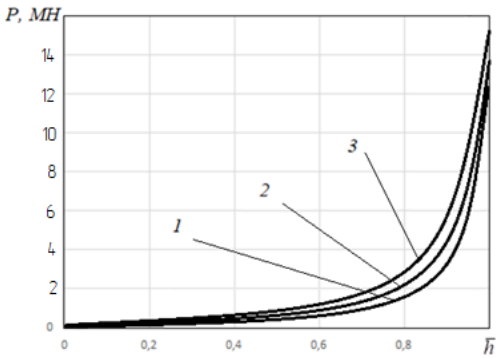


Рис. 6. Изменение силы формообразующего процесса при изменении коэффициента трения: 1 – 0,15; 2 – 0,2; 3 – 0,3 (высота облойной канавки 2 мм)

При анализе деформированного состояния заготовки видно, что наибольший уровень интенсивности деформаций сосредоточен в области радиусного перехода от шаровой головки в тело поковки, причем увеличение зазора облойной канавки не приводит к существенному изменению деформированного состояния заготовки. Увеличение коэффициента трения с 0,15 до 0,3 приводит к снижению уровня интенсивности деформаций на 10…15%.

Исследовалось изменение величины силы операции в зависимости от относительного хода ползуна пресса $\overline{h} = h / h_{\max}$ и высоты облойной канавки показано на рис. 6.

Анализ изменения силовых режимов показывает, что увеличение коэффициента трения с 0,15 до 0,3 приводит к увеличению силы на ползуне пресса на 15…20%, а увеличение высоты облойной канавки не приводит к изменению силовых значений операции штамповки детали «Палец шаровой». Максимум силы приходится на завершительную стадию операции, где происходит формирование окончательного профиля поковки и уменьшение высоты мостика облойной канавки до номинального значения.

Список литературы

1. Ковка и штамповка. Справочник в 4-х томах. Под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010.

2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

3. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

4. Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия в 4-х т. / под ред. Касаева К.С. 1994. Рос. космич. агентство. Т 4. 208 с.

5. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т 3. 6-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1982. 576 с.

6. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / В.А. Голенков, А.М. Дмитриев, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев и др.; под ред. В.А. Голенкова, А.М. Дмитриева. М.: Машиностроение, 2004. 464 с.

7. Технология конструкционных материалов (Технологические процессы в машиностроении): учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов: в 4 ч. Ч. 3. Производство заготовок / С.П. Яковлев [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 582 с.

8. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1983. 352 с.

9. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. 836 с.

10. Теория ковки и штамповки / Под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1992. 720 с.

11. Яковлев С.П., Кухарь В.Д. Штамповка анизотропных заготовок. М.: Машиностроение, 1986. 136 с.

12. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев: Квант. 1997. 332 с.

Романов Павел Витальевич, аспирант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Харченко Антон Витальевич, студент, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MODELING OF THE PROCESS OF VOLUMETRIC STAMPING FORGING OF THE "BALL FINGER" PART

P.V. Romanov, A.V. Kharchenko

The article deals with the issues of computer modeling of the process of volumetric deformation of a pre-rolled workpiece in order to obtain the forging of the "Paley ball" part. Pre-rolling of cylindrical workpieces is used to give the optimal shape and redistribution of metal in the axial direction. Optimized harvesting helps to minimize the loss of metal spent on the coating in open dies. The carried out modeling allowed to reveal the influence of technological parameters of the process, friction conditions, the height of the hollow groove on the stress-strain state of the forging, power modes of operation. The main advantages and disadvantages of the proposed technological scheme are shown.

Key words: open stamping, power modes, forging, stress intensity, strain intensity.

Romanov Pavel Vitalyevich, postgraduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kharchenko Anton Vitalievich, student, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-344-345

ВЫСАДКА ПУСТОТЕЛЫХ ТИТАНОВЫХ ОБОЛОЧЕК

А.А. Пасынков, Ю.В. Бессмертная

Обработкой давлением можно обеспечить локальный набор металла на полнотелых и пустотелых заготовках. В процессе деформирования формируются в материале заготовки формируются как положительные, так и отрицательные напряжения. Есть необходимость оценки величин интенсивностей напряжений и величин средних напряжений, формируемых в заготовке. Для чего выполнено моделирование деформирования оболочки из титанового сплава. Выполнена оценка напряжений при деформировании трубы разных толщин с разными скоростями. Получены графические зависимости изменения напряжений при деформировании.

Ключевые слова: высадка, моделирование, формоизменение, сила, напряжения, деформации.

В статье рассмотрена операция обработки давлением, позволяющая сформировать утолщенный край н титановой оболочке. Формирование утолщенной части на оболочках необходимо для дальнейшего соединения сваркой различных элементов трубопроводных систем. Материал заготовки отличается повышенными прочностными характеристиками. Ввиду этого для достижения необходимых степеней деформаций необходим нагрев до температур горячей штамповки. Выполнено моделирование деформирования оболочки из титанового сплава. Есть необходимость оценки величин интенсивностей напряжений и величин средних напряжений, формируемых в заготовке. Выполнена оценка напряжений, формируемых в металле при деформировании трубы разных толщин. Установлено влияние скоростей деформирования на напряжения и их интенсивности.

На рис. 1 представлены эскизы высадки для разных схем воздействия рабочего инструмента на заготовку.

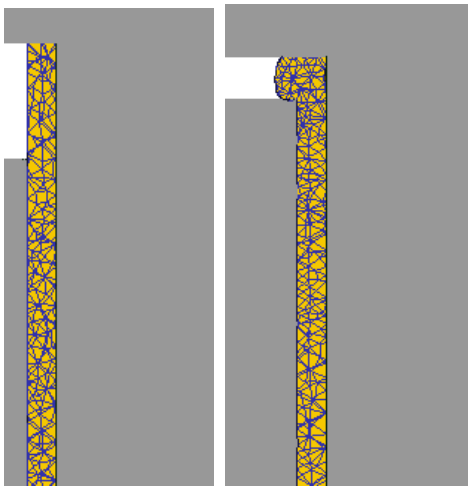
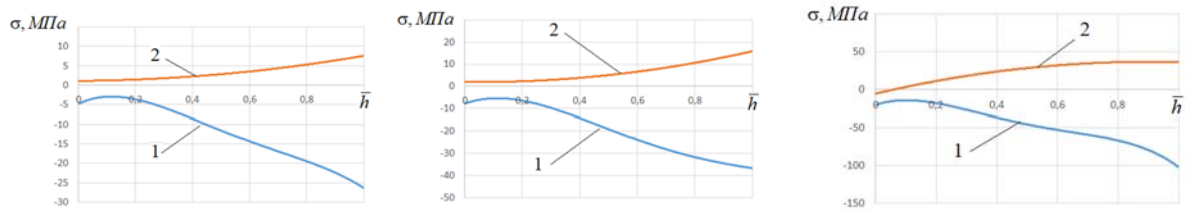


Рис. 1. Эскиза исследуемой операции

Заготовка под высадку принималась труба диаметром 60 мм. Толщина заготовки $t = 3\ldots7$ мм. Величина рабочего хода 12 мм. Начальное расстояние между инструментами 20 мм. Материал заготовки ВТ6. Температура нагрева $900°C$. Скорость деформирования $V = 1\ldots10$ мм/мин. Коэффициент трения 0,3. Было выполнено моделирование в программном комплексе DEFORM. Выполнен анализ изменения максимальных величин растягивающих и сжимающих напряжений для разных толщин стенки и скоростей деформирования. На рис. 2 показаны графики изменения напряжений в процессе высадки для заготовок с толщиной стенки $t = 3$ мм.

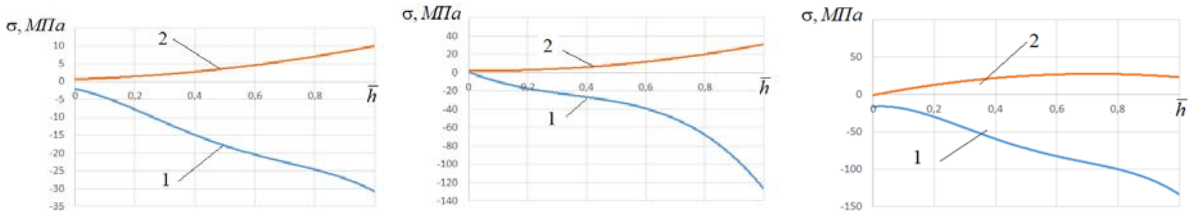


а ***б*** ***в***

Рис. 2. К оценке изменения максимальных величин напряжений в детали ($t = 3$ мм): а - $V = 1$ мм/мин; б - $V = 5$ мм/мин; в - $V = 10$ мм/мин; 1 – максимальные сжимающие напряжения; 2 - максимальные растягивающие напряжения

Исходя из анализа рис. 2 можно сказать, что рост скоростей перемещения инструмента при высадке заготовок толщиной 3 мм приводит к росту растягивающих напряжений в 4 раза и сжимающих в 3,5…4 раза.

На рис. 3 показаны графики изменения напряжений в процессе высадки для заготовок с толщиной стенки $t = 5$ мм.

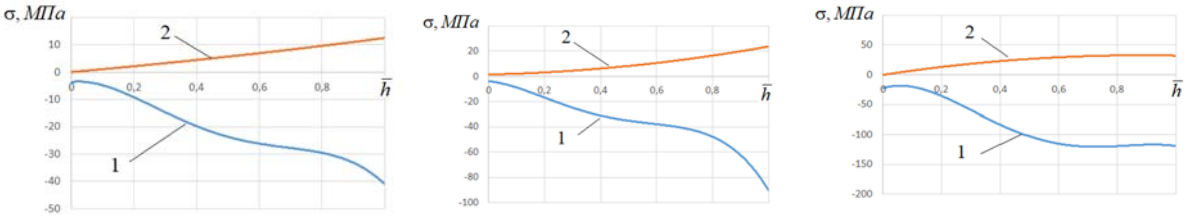


а *б* *в*

Рис. 3. К оценке изменения максимальных величин напряжений в детали ($t = 5$ мм): а - $V = 1$ мм/мин; б - $V = 5$ мм/мин; в - $V = 10$ мм/мин; 1 – максимальные сжимающие напряжения; 2 - максимальные растягивающие напряжения

Из рис. 3 можно сказать, что рост скоростей перемещения инструмента при высадке заготовок толщиной 5 мм приводит к росту растягивающих напряжений в 3,5 раза и сжимающих в 3,5 раза.

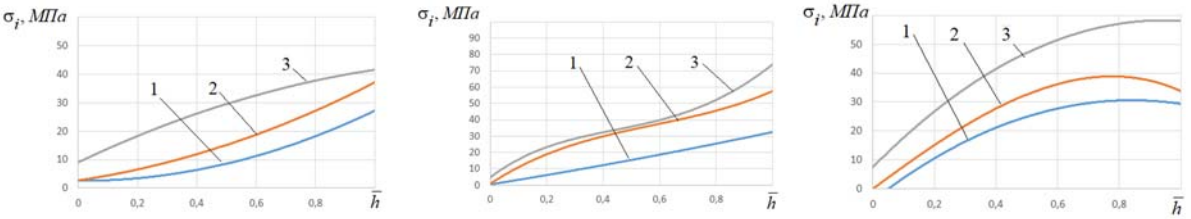
На рис. 4 показаны графики изменения напряжений в процессе высадки для заготовок с толщиной стенки $t = 7$ мм. Из графиков, приведенных ниже видно, что рост скоростей перемещения инструмента при высадке заготовок толщиной 7 мм приводит к росту растягивающих напряжений в 3 раза и сжимающих в 3,0 раза. Таким образом, с ростом толщины стенки материала влияние скоростей деформирования на величины максимальных напряжений в изделии снижается. Но в целом обеспечение минимально возможных скоростей перемещения инструмента обеспечивает как меньшую неравномерность напряжений, так и меньшие величины максимальных напряжений.



а *б* *в*

Рис. 4. К оценке изменения максимальных величин напряжений в детали ($t = 7$ мм): а - $V = 1$ мм/мин; б - $V = 5$ мм/мин; в - $V = 10$ мм/мин; 1 – максимальные сжимающие напряжения; 2 - максимальные растягивающие напряжения

На рис. 5 показаны графики изменения интенсивностей напряжений в изделии при высадке заготовки с толщинами стенки $t = 3$ мм; $t = 5$ мм; $t = 7$ мм и скоростями деформирования $V = 1$ мм/мин; $V = 5$ мм/мин; $V = 10$ мм/мин. Выявлено, что с ростом толщины стенки величины интенсивностей напряжений имеют схожие величины. Увеличение скоростей перемещения пуансона приводит к росту интенсивностей напряжений на 20… 30 %. Интенсивность напряжений в продолжении рабочего хода инструмента непрерывно растет. Характер роста интенсивности напряжений практически линейный.



а *б* *в*

Рис. 5. К оценке изменения интенсивностей напряжений в детали: а – $t = 3$ мм; б – $t = 5$ мм; в - $t = 7$ мм; 1 - $V = 1$ мм/мин; 2 - $V = 5$ мм/мин; 3 - $V = 10$ мм/мин

В рассматриваемом диапазоне скоростей деформирования величины максимальных напряжений имеют незначительные величины, значительно меньшие чем критические. Таким образом выявлено, что при высадке трубной заготовки из титанового сплава позволяет обеспечить заметное снижение неравномерности напряженного состояния, величин максимальных напряжений и интенсивностей напряжений.

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. Alves L.M., Afonso R.M., Silva C.M.A., Martins P.A.F. Boss forming of annular flanges in thin-walled tubes. Journal of Materials Processing Technology. 2017, Volume 250. P. 182-189.

9. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. М., Металлургия, 1976. 488 с.

Пасынков Андрей Александрович, канд. техн. наук, доцент, sulee@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Бессмертная Юлия Вячеславовна, канд. техн. наук, доцент, bessmertny@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DISEMBARKATION OF HOLLOW TITANIUM SHELLS

A.A. Pasynkov, Yu.V. Immortal

Pressure treatment can provide a local set of metal on full-bodied and hollow workpieces. In the process of deformation, both positive and negative stresses are formed in the workpiece material. There is a need to estimate the values of stress intensities and the values of average stresses formed in the workpiece. For this purpose, the deformation of the titanium alloy shell was simulated. Stress assessment was performed during deformation of pipes of different thicknesses with different speeds. Graphical dependences of stress changes during deformation are obtained.

Key words: landing, modeling, shape change, force, stresses, deformations.

Pasynkov Andrey Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, sulee@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Bessmertnaya Yulia Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, docent, bessmertny@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7.043
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-346-347

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАМИ С РАЗНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

Л.В. Каркач

Метод штамповки является одним из наиболее эффективных способов производства деталей из металла. Этот процесс позволяет массово и быстро производить высококачественные и точные детали с минимальными затратами на материалы и рабочую силу. Существует большое разнообразие методов штамповки, одним из которых является объемная штамповка, в частности обратное выдавливание, с помощью которого изготавливается широкая номенклатура осесимметричных изделий. В данной работе исследуется получение детали при разной конфигурации пуансона, осуществляющего непосредственно изменение формы. Рассматривался пуансон с гладкой давящей поверхностью и закругленной. Оценка проводилась с помощью компьютерного моделирования в специальном программном обеспечении. В работе исследуются силовые параметры, требуемые для получения изделия, а также интенсивности деформаций. Приводятся графики усилий, а также распределения интенсивности деформаций в сечениях. После анализа данных делаются выводы о влиянии формы пуансона на основные параметры операции обратного выдавливания.

Ключевые слова: штамповочное производство, компьютерное моделирование, обратное выдавливание, штамповая оснастка, силовые характеристики, напряженно-деформированное состояние.

Штамповка, литье и обработка резанием — это три основных метода формирования и обработки металлических изделий [1-3]. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, которые следует учитывать при выборе оптимального способа производства и обработки. Штамповка является одним из популярных методов формирования металлических изделий, однако этот метод имеет ряд достоинств и недостатков. Так преимущества штамповки включают:

1. Высокая точность и качество получаемого изделия. Штамповка позволяет получить детали с высокой точностью размеров и формы.

2. Высокая производительность. Штамповка позволяет производить детали в больших количествах за малый промежуток времени, что делает этот метод эффективным для серийного и массового производства.

3. Экономическая эффективность. С помощью штамповки можно использовать материал более эффективно, так как отходы минимизируются.

Однако у штамповки есть и некоторые недостатки:

1. Ограничения для получения сложной геометрии детали. Штамповка не всегда подходит для изготовления деталей со сложной формой или внутренними полостями.

2. Высокие затраты на создание штампа. Процесс разработки и изготовления штампа может быть дорогим и требовательным ко времени.

3. Ограниченная гибкость. Штамповка подразумевает использование одного и того же штампа для производства однотипных изделий, что делает этот метод менее гибким для индивидуальных заказов и штучных производств.

В целом, применение штамповки для изготовления деталей из металла является эффективным и универсальным методом производства. Что позволяет производить большие объемы деталей при их высоком качестве. При правильном подходе применение штамповки может значительно снизить затраты на производство и увеличить его эффективность.

Существует большое разнообразие методов штамповки, одним из которых является объемная штамповка, в частности обратное выдавливание, с помощью которого изготавливается широкая номенклатура осесимметричных изделий [4-6]. Поэтому с помощью данного метода была предпринята попытка получения изделия стаканообразной формы из цилиндрической сплошной заготовки. При этом оценивалось получение детали при разной конфигурации пуансона, осуществляющего непосредственно изменение формы. Рассматривался пуансон с гладкой давящей поверхностью и закругленной, вторая форма предположительно улучшает течение материала. Анализ проводился в программе QForm [7-9], и в первую очередь были проанализированы силовые характеристики процессов обратного холодного выдавливания (рис. 1).

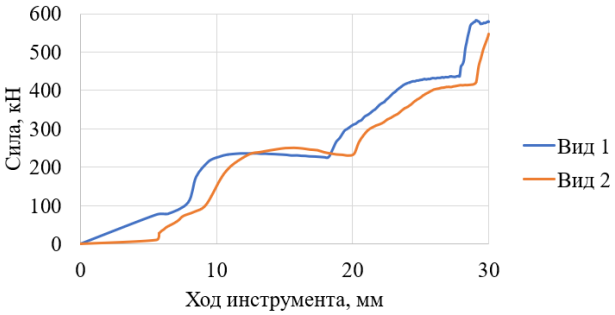
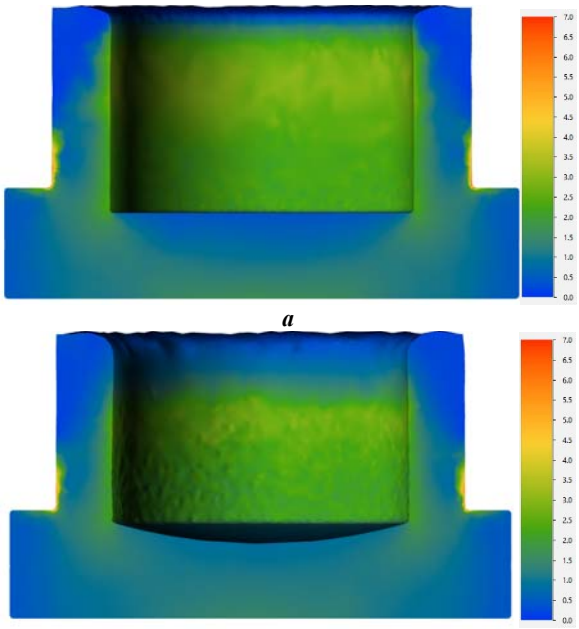


Рис. 1. График силы

При оценке технологической силы обратного выдавливания установлено, что форма пуансона влияет на эту характеристику. При этом разница составляет не менее 6%, и выявлено, что плоский пуансон требует большего усилия, чем закругленный.

Далее проводилась оценка интенсивности деформаций на последней завершающей стадии изменения формы (рис. 2).



а

б

Рис. 2. Интенсивности деформаций

При использовании сферической давящей поверхности интенсивность деформаций в зоне непосредственно под пуансоном существенно выше и находится в пределах от 1 до 2, в то время как при использовании плоского пуансона в большой части детали интенсивность деформаций близка к 0. В остальном распределения деформаций практически идентично, также максимальные значения почти одинаковы.

Список литературы

1. Никифоров А.Д. Современные проблемы науки в области технологии машиностроения / А.Д. Никифоров. М.: Высшая школа, 2006. 392 с.

2. Производство заготовок в машиностроении М.Г. Афонькин, М.Р. Магницкая. Л.: Машиностроение, 1987. 256 с.

3. Корсаков В. С. Основы конструирования приспособлений в машиностроении М.: Машиностроение, 1971. 288 с.

4. 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.

5. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред.совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1987. Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого, 1987. 384 с.

6. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я. М. Охрименко. М. : Машиностроение, 1976. 560 с.

7. Яковлев С. С., Архипцев А. С., Павлушин В. О. Влияние количества выступов матрицы на неоднородность поля напряжений и деформаций в процессе формирования сетки рифлей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 5. С. 337-340. EDN BRXRPD.

8. Кондаков Д.И. Оценка силовых характеристик процесса прошивки компьютерным моделированием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №3. С. 128-130. EDN: SJIGZS.

9. Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением. Версия VX 8.2. Учебный курс на примерах. Часть 3. Учебный курс на примерах. «КванторФорм», 2017. 196 с.

Каркач Леонид Витальевич, магистрант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Научный руководитель: Пасынков Андрей Александрович, канд. техн. наук, доцент, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STUDY OF THE REVERSE EXTRUSION PROCESS USING TOOLS WITH DIFFERENT GEOMETRY

L.V. Karkach

The stamping method is one of the most effective ways to produce metal parts. This process allows for the mass and rapid production of high-quality, precise parts with minimal material and labor costs. There is a wide variety of stamping methods, one of which is volumetric stamping, in particular reverse extrusion, which is used to produce a wide range of axisymmetric products. In this work, we study the production of a part with different configurations of the punch, which directly changes the shape. A punch with a smooth pressing surface and a rounded one was considered. The assessment was carried out using computer modeling in special software. The work examines the force parameters required to obtain the product, as well as the intensity of deformation. Graphs of forces are presented, as well as distributions of strain intensity in sections. After analyzing the data, conclusions are drawn about the influence of the punch shape on the main parameters of the reverse extrusion operation.

Key words: stamping production, computer modeling, reverse extrusion, stamping equipment, power characteristics, stress-strain state.

Karkach Leonid Vitalevich, undergraduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Scientific advisor: Pasynkov Andrej Aleksandrovich, candidate of technical science, docent, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7.01; 621.7.79
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-349-350

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КОРОБОК В РАДИАЛЬНЫЕ МАТРИЦЫ

Ю.Д. Исаева, А.В. Харченко

Вытяжка коробчатых изделий из листовых заготовок характеризуется высокой вероятностью потери устойчивости либо в виде формирования складок, либо в высокой возможности отрыва донной части. Этому могут способствовать значительные напряжения, формирующиеся в области перехода дна в стенку. В статье рассмотрена операция вытяжки профильной заготовки в матрицу с радиальной заходной поверхностью. Проанализировано изменение интенсивностей напряжений в детали для разных величин скругления рабочей поврехности матрицы. Расчеты для исследуемой операции проводились посредством CAE-моделирования. Получены результаты в виде графиков и схем.

Ключевые слова: моделирование, вытяжка, интенсивности напряжений, формоизменение.

В машиностроении, и в частности автомобилестроении часто используются коробчатые изделия из тонколистового металла в качестве корпусов, элементов жесткости, различных крышек и т.д. При значительных размерах и большой площадью в плане, формируются значительные напряжения в местах перехода дна в стенку, во фланцевой части полуфабриката действуют сжимающие напряжения. Такое напряженное состояние приводит к вероятности как к складкообразования торцевой части детали, так и к обрыву дна. Ввиду этого имеется целесообразность оценки изменения интенсивностей напряжений на разных этапах деформирования для радиальных матриц с разными скруглениями заходной кромки [1-4].

Выполнено CAE-моделирование процесса вытяжки профилированных заготовок под изготовление невысоких коробок прямоугольной формы. В качестве заготовки выбиралась рассчитанная по специальной методике профильная заготовка, эскиз которой с размерами приведен на рис. 1. Толщина листового материала 1,2 мм. Материал заготовки сталь 45. В качестве инструмента использовался пуансон с радиусом кромки 5 мм, матрица с радиальной рабочей поверхностью и радиусами закругления входного участка 3, 6, 10 мм. Коэффициент трения задавался равным 0,08. Операция осуществляется в холодных условиях. Моделирование выполнялось в программе DEFORM.

На рис. 2 представлен эскиз готовой детали с номинальными размерами.

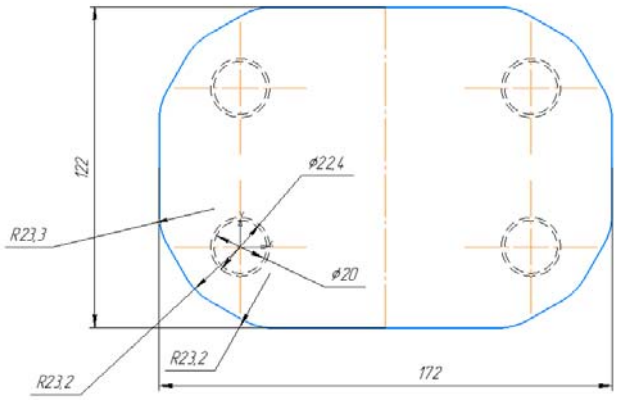


Рис. 1. Эскиз детали

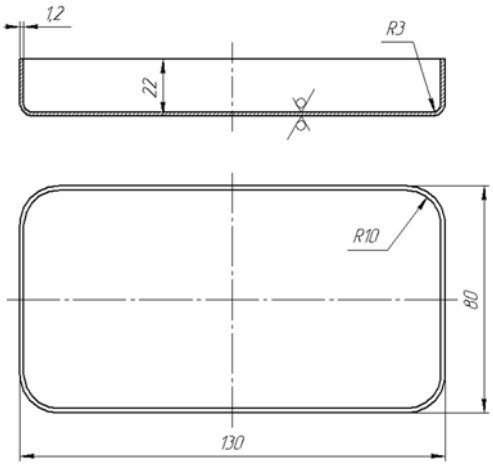


Рис. 2. Эскиз прямоугольной коробки

Ниже приводятся результаты моделирования операции вытяжки заготовки в радиальной матрице с радиусами закругления входной кромки 3, 5, 10 мм на разных стадиях процесса.

На рис. 3 показаны схемы распределения интенсивностей напряжений в матрицах с радиусом 3 мм.

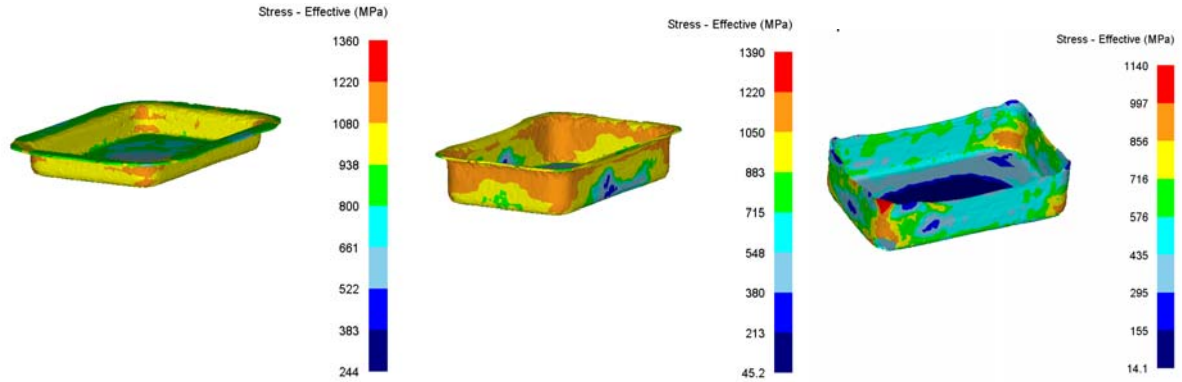


Рис. 3. Изменение интенсивностей напряжений в детали ($R = 3$ мм)

Схемы распределения интенсивностей напряжений в деформируемой заготовке показали, что наибольший уровень напряжений соответствует начальной стадии, когда радиусы закруглений рабочих инструментов (пуансона и матрицы) находятся на одной линии. В данный момент времени наиболее вероятно разрушение заготовки, в связи с возможностью локализации пластических деформаций. По мере продвижения пуансона и уменьшения фланцевой части, уровень интенсивности напряжений уменьшается.

На рис. 4 даны схемы распределения интенсивностей напряжений в матрицах с радиусом 5 мм.

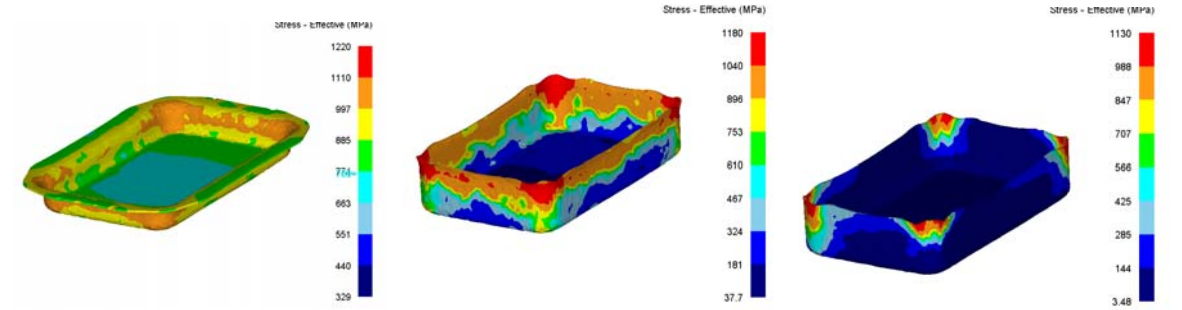


Рис. 4. Изменение интенсивностей напряжений в детали ($R = 5$ мм)

На рис. 5 даны схемы распределения интенсивностей напряжений в матрицах с радиусом 10 мм.

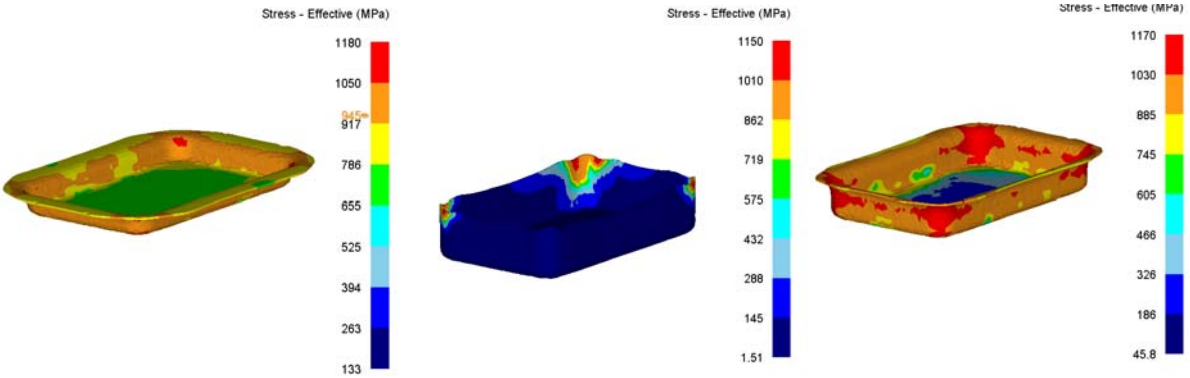


Рис. 4. Изменение интенсивностей напряжений в детали ($R = 10$ мм)

Анализ полученных изображений распределения величин интенсивностей напряжений в заготовках в зависимости от радиуса скругления входной кромки на матрице показал, что увеличение радиуса от 3 до 10 мм способствует снижению интенсивностей напряжений на 10…15%. Особенно явно снижение уровня напряжений проявляется в начальный момент деформирования.

Получены графики изменения минимальных и максимальных напряжений в детали в течении всего процесса. На рис. 5 представлен график изменения минимальных напряжений в детали.

На рис. 6 представлен график изменения максимальных напряжений в детали.

Графики изменения минимальных напряжений в деформируемых заготовках в зависимости от относительного перемещения инструмента показывает соответствие максимального уровня напряжений моменту совмеще-

ния радиусов закруглений пуансона и матрицы. К концу операции минимальные напряжения стремятся к нулевым значениям при любых величинах радиусов на инструменте.

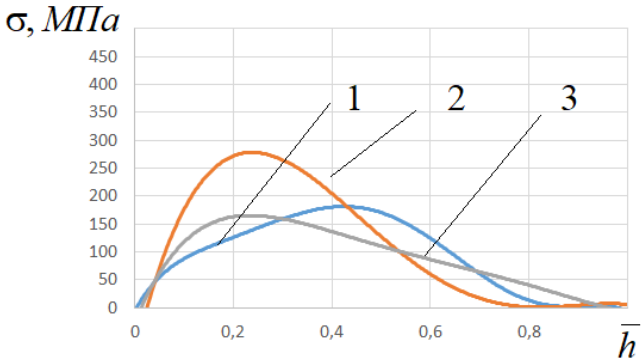


Рис. 5. График изменения минимальных напряжений в детали: $R = 3$ ***мм;*** $R = 5$ ***мм;*** $R = 10$ ***мм***

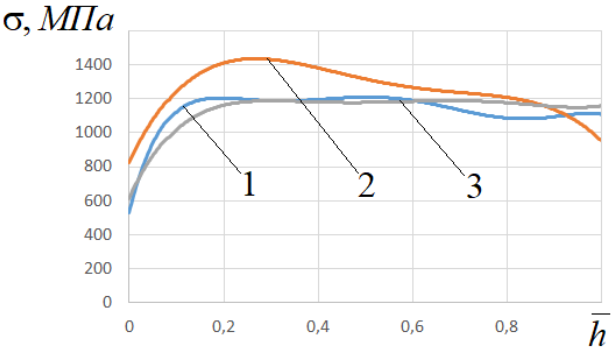


Рис. 6. График изменения максимальных напряжений в детали: $R = 3$ ***мм;*** $R = 5$ ***мм;*** $R = 10$ ***мм***

Графики изменения максимальных напряжений в деформируемых заготовках не имеют ярко выраженных экстремумов, т.к. данные максимальные напряжения сосредоточены в угловых зонах, которые являются наиболее нагруженными в течение всей формообразующей операции.

Список литературы

1. Пасынков А.А., Аккуратнова А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния и возможностей формоизменения тонкостенной трубной заготовки из сплава ВТ14 при ее раздаче в изотермических условиях // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2017. Вып. 9. С. 286-290. **2**

2**.** Пасынков А.А., Борискин О.И., Ларин С.Н. Теоретические исследования операции изотермической раздачи труб из труднодеформируемых цветных сплавов в условиях кратковременной ползучести // Цветные металлы. 2018. №2. С. 74-78.

3. Трегубов В.И., Ларин С.Н., Пасынков А.А., Нуждин Г.А. Оценка влияния геометрии инструмента на силовые параметры совмещенного процесса вытяжки и отбортовки // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. №4. С. 165-167.

4. Грязев М.В., Ларин С.Н., Черняев А.В. Предельные возможности формообразования при обжиме трубной заготовки в матрице конической формы // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2016. Вып. 7. С. 3-8.

Исаева Юлия Дмитриевна, студент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Харченко Антон Витальевич, студент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ESTIMATION OF STRESS INTENSITIES WHEN DRAWING RECTANGULAR BOXES INTO RADIAL MATRICES

Yu.D. Isayeva, A.V. Kharchenko

The extraction of box products from sheet blanks is characterized by a high probability of loss of stability either in the form of crease formation or in the high possibility of separation of the bottom part. This can be facilitated by significant stresses formed in the transition of the bottom into the wall. The article considers the operation of drawing a profile

blank into a matrix with a radial entrance surface. The variation of stress intensities in the part for different values of the rounding of the working area of the matrix is analyzed. Calculations for the operation under study were carried out using CAE modeling. The results are obtained in the form of graphs and diagrams.

Key words: modeling, drawing, stress intensity, shape change.

Isayeva Yulia Dmitrievna, student, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kharchenko Anton Vitalievich, student, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7.043
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-352-353

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОГО ИЗДЕЛИЯ ОБРАБОТКОЙ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

К.А. Галицина

Обработка металлов давлением является одним из наиболее эффективных и широко применяемых методов обработки и формообразования заготовок. В сравнении с другими методами, такими как литье, сварка или обработка резанием, штамповка обладает рядом преимуществ, которые делают этот способ используемым во многих отрасляй промышленности. В данной статье представлен анализ и обзор основных преимуществ штамповки относительно других методов обработки металлов. Также в данной работе проводится компьютерное моделирование процесса получения изделия со сложным профилем методом объемной штамповки. Основное внимание в работе акцентируется на результаты исследования влияния коэффициента трения на силовые параметры процесса, приводится график усилия изменения формы металлической заготовки, проводится анализ напряженного и деформированного состояния. По результатам компьютерного моделирования делаются выводы о том, как влияет коэффициент трения на различные характеристики объемной штамповки включая усилие, интенсивность напряжений и деформаций.

Ключевые слова: пластическое формоизменение, объемная штамповка, изделие со сложной формой поперечного сечения, компьютерное моделирование, усилие, штамповка.

В современном промышленном производстве механическая обработка металлов является неотъемлемой частью процесса изготовления различных деталей и изделий [1-3]. Существует множество методов обработки металлов, включая фрезеровку, токарную обработку, сварку и штамповку [4]. В данной статье рассматриваются преимущества штамповки [5-6] относительно других методов обработки металлов и исследуем его влияние на промышленность. Одним из ключевых преимуществ этого метода является возможность точной обработки металла, она позволяет получать детали с точными размерами и геометрией, что является особенно важным для промышленности, где требуется высокое соответствие размерных характеристик. Еще одно преимущество штамповки – возможность обработки большого количества заготовок за короткое время, то есть высокая производительность, что существенно сокращает время производства и приводит к снижению затрат. Также штампованные детали обладают высокой прочностью и износостойкостью, это особенно важно в условиях высоких нагрузок, например, в автомобильной и аэрокосмической промышленности. Помимо этого, штамповка позволяет экономить материалы, так как используется минимальное количество материала для создания детали, это достигается за счет небольшого отхода металла. Также штамповка позволяет создавать детали со сложной формой, так как штамповая оснастка может быть спроектирована для создания деталей с высокой сложностью геометрии.

Поэтому для получения изделия (рис. 1) был выбран метод объемной штамповки, для этого использовалась заготовка цилиндрической формы, которая в последствии формоизменяется в матрице пуансоном. Для этого было проведено компьютерное моделирование в программе QForm [7-10], где проводилось исследование пластического формоизменения стальной цилиндрической заготовки при разных режимах трения.

Рис. 1. Трехмерная модель детали

В качестве модели трения использовалось трение Кулона с коэффициентами 0, 0,1 и 0,3. И были извлечены данные о требуемых для формоизменения силах (рис. 2).

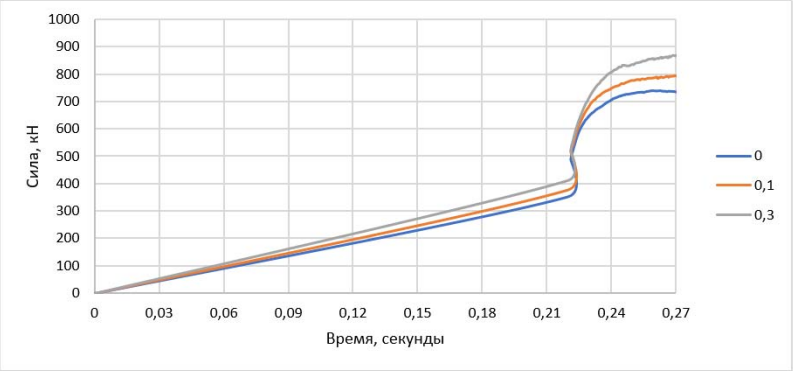


Рис. 2. График технологической силы от времени при разных коэффициентах трения

По данным кривым можно отметить, что трение оказывает влияние на технологическую силу, и разница при увеличении трения от 0,1 до 0,3 составляет более 10%, при этом форма кривых одинакова. Далее проводится оценка напряженного и деформированного состояния (см. табл.).

К исследованию напряженного и деформированного состояния

Коэффициент трения	**0**	**0,1**	**0,3**
Интенсивность напряжений, МПа	359	376	379
Интенсивность деформаций	8,4	7,6	10,4

Установлено, что с увеличением коэффициента трения возрастает интенсивность напряжений и деформаций. Увеличение интенсивности напряжений составляет почти 10%, а интенсивности деформаций более 20%.

Таким образом в ходе моделирования выявлено, что трение оказывает большое влияние на весь процесс формирования сложнопрофильной детали. И в данном случае влияние трения выражено в увеличении технологической силы, возрастании интенсивности напряжений и деформаций. В дальнейшем планируется изучение повреждаемости материала, вероятности дефектообразования и иных характеристик от которых зависит качество детали.

Список литературы

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 905 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. Основы технологии машиностроения. / Под ред. В.С-Корсакова. Изд. 3-е, доп. и перераб.: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1977. 416 с.

4. Афонькин М.Г., Магницкая М.В. Производство заготовок в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1987. 256 с.

5. Патент № 2801517 C1 Российская Федерация, МПК B21C 37/20. Способ получения оболочек с ребрами на наружной поверхности: № 2022129738: заявл. 16.11.2022: опубл. 09.08.2023 / С. С. Яковлев, В. А. Коротков, В. Д. Кухарь [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет". EDN GXIPTZ.

6. Букарев И. М., Бабин Д. М. Моделирование процесса объемной штамповки в DEFORM 3D и QFORM 3D // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. № 6. С. 5. EDN JWKJQD.

7. Самсонов Н. А., Хрычев И. С. Влияние профиля заходной части матрицы на геометрию изделий при вытяжке круглых заготовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 3. С. 122-126. EDN IWQFYF.

8. Применения пакета QFORM 3D для восстановления рабочих поверхностей разжимных Кулаков тормозной системы автомобиля / В. Г. Шибаков, Д. Л. Панкратов, А. И. Швеев [и др.]. 2009. № 2(38). С. 243-248. EDN TWIAFP.

9. Элингхаузен Т., Стебунов С. А. QForm 7 - новое слово в моделировании процессов обработки металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 2. С. 31-34. EDN SNXTSN.

10. QForm 2D/3D Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением Версия VX. Часть 2. Руководство пользователя. «КванторФорм», 2018. 431 с.

Галицина Ксения Алексеевна, магистрант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Научный руководитель: Платонов Валерий Иванович, канд. техн. наук, доцент, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MODELING OF OBTAINING A COMPLEX-PROFILE PRODUCT BY PRESSURE TREATING OF METALS

K.A. Galitsina

Metal forming is one of the most effective and widely used methods of processing and shaping semi-finished products. Compared to other methods such as casting, welding or machining, stamping has a number of advantages that make this method used in many industries. This article presents an analysis and overview of the main advantages of stamping relative to other metal processing methods. Also in this work, computer simulation of the process of producing a product with a complex profile using the method of volumetric stamping is carried out. The main attention in the work is focused on the results of a study of the influence of the friction coefficient on the power parameters of the process, a graph of the force of changing the shape of a metal workpiece is presented, and an analysis of the stressed and deformed state is carried out. Based on the results of computer modeling, conclusions are drawn about how the friction coefficient influences various characteristics of volumetric forging, including force, intensity of stress and deformation.

Key words: plastic forming, volumetric stamping, product with a complex cross-sectional shape, computer modeling, force, stamping.

Galitsina Ksenia Alekseevna, undergraduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Scientific advisor: Platonov Valery Ivanovich, candidate of technical science, docent, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.73.01
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-354-355

ПОЛУЧЕНИЕ ОБОЛОЧКИ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

А.И. Гасанов

Исследования и компьютерные моделирования в области штамповки металлических деталей стали неотъемлемой частью разработки и производства изделий. В этой статье рассматривается необходимость проведения исследований и использования компьютерных моделирований в области обработки металлов давлением. В статье описаны основные преимущества и особенности исследований процессов обработки металлов давлением с помощью применения метода компьютерного моделирования. Также в работе приводятся результаты исследования операции обратного выдавливания с помощью математического моделирования при использовании разной по форме штамповой оснастки. Приводятся данные о технологической силе, интенсивности напряжений и деформаций, растягивающих и сжимающих напряжениях. В работе также приводится график технологической силы обратного выдавливания и делаются выводы на основе полученных данных о влиянии формы инструмента на напряженное и деформированное состояние.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, компьютерные моделирования, обратное выдавливание, технологическая сила, интенсивность напряжений, средние напряжения.

В настоящее время в науке все чаще используются современные технологии, такие как компьютерные моделирования, в том числе данный метод используется и в процессах обработки металлов давлением [1-3]. Это позволяет более точно предсказывать поведение материалов при штамповке и позволяет учитывать множество факторов, таких как величины деформаций, термообработку, геометрические характеристики инструмента и заготовки. Это особенно необходимо при разработке сложных деталей, которые требуют точности изготовления и высокого качества. Кроме того, компьютерные моделирования позволяют проводить имитационные испытания и оптимизацию процесса пластического изменения формы. Это сокращает время и затраты на изготовление и испытание прототипов, что является существенным экономическим преимуществом.

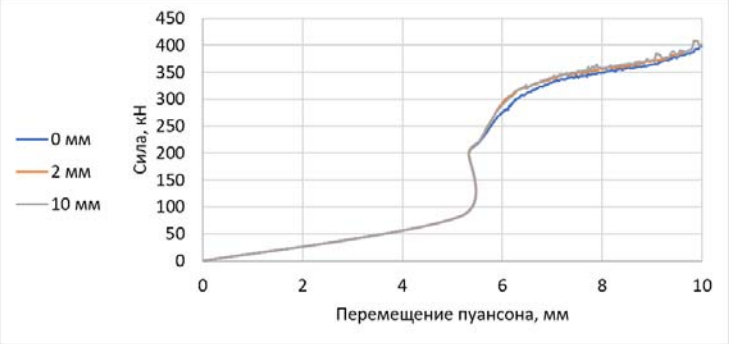


График технологической силы

Другим преимуществом компьютерных моделирований является возможность исследования нестандартных методов и процессов штамповки. Например, новые способы и материалы, добавление дополнительных этапов обработки, может способствовать созданию новых типов изделий и повышению качества продукции. Важно отметить, что моделирования позволяют проводить анализ и оптимизацию не только самого процесса штамповки, но и других факторов, влияющих на качество и производительность. Например, можно изучать влияние скорости деформирования, температуры обработки на детали и инструменты. Еще одно важное преимущество компьютерных

моделирований – возможность прогнозировать дефекты и деформации в процессе штамповки. Это позволяет заранее определить возможные проблемы и внести соответствующие изменения в процесс или конструкцию деталей, чтобы избежать снижения качества изделий.

Данная работа нацелена на изучение влияния формы инструмента при обратном выдавливании на многие характеристики процессов, включая напряженно-деформированное состояние [4-6]. Исследование выполнено с помощью компьютерного моделирования в программе QForm [7-10] и объектом изучения является обратное выдавливание, в котором пуансон может иметь разную конфигурацию, включая разную высоту кромки. Ранее было установлено, что на форму изделия этот фактор не оказывает влияния, поэтому требуется оценить силовые характеристики процесса (см. рис.) и иные характеристики, такие как напряженное и деформированное состояние в образцах.

Из графика установлено, что такой параметр как высота кромки не существенно влияет на силу штамповки, так как общая картина изменения кривых идентична, а пиковые значения отличаются не существенно. Далее были оценены максимальные значения характеристик напряженно-деформированного состояния (см. табл.).

Оценка характеристик процесса

Высота пояска, мм	0	2	10
Технологическая сила, кН	393	398	405
Растягивающие напряжения, МПа	95	98	100
Сжимающие напряжения, МПа	850	848	853
Интенсивность деформаций	3,38	3,36	3,35
Интенсивность напряжений, МПа	187	186	190

В таблице приведены максимальные значения, которые были получены компьютерным моделированием. Величина растягивающих и сжимающих напряжений практически одинакова и отличается на несколько процентов, что указывает на погрешность определения и вычисления. Аналогичная ситуация наблюдается и с интенсивностями напряжений и деформаций, разница составляет несколько единиц, при анализе распределения установлено, что они также схожи для всех рассматриваемых случаев. Таким образом можно сделать вывод о том, что в целом величина рабочей кромки не оказывает влияния на силовые характеристики процессов, а также напряженное и деформированное состояние в полуфабрикате.

Список литературы

1. Вакалов А.А. Применение компьютерного моделирования при разработке процессов горячей штамповки поковок лопаток // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 1. С. 36-41.

2. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении / Тихонов А.Н. и др. М.: Машиностроение, 1990. 264 с.

3. Кинзин Д.И., Рачков С.С. Использование программного комплекса DEFORM-3D при моделировании процессов сортовой прокатки // Вестник МГТУ им. Г.И.Носова. 2011. №2. С. 45-49.

4. 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 – М.: Машиностроение, 2010. 732 с.

5. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Изд. 5-е, перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1979, 520 с.

6. Горохов В.А. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов. В 2-х т. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов: Учебник / В.А. Горохов. Ст. Оскол: ТНТ, 2012. 1072 с.

7. Романов П. В., Харченко А. В. исследование операции формовки ступенчатых деталей в ленте // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 138-142. EDN GXXULP.

8. QForm 2D/3D Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением Версия VX. Часть 2. Руководство пользователя. «КванторФорм», 2018. 431 с.

9. Алексеев А. В. Анализ холодного выдавливания алюминиевой заготовки численными методами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 12. С. 566-568. EDN IJNEKW.

10. Самсонов Н. А., Хрычев И. С. Влияние профиля заходной части матрицы на геометрию изделий при вытяжке круглых заготовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 3. С. 122-126. EDN IWQFYF.

Гасанов Аббас Иса оглы, магистрант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Научный руководитель: Пасынков Андрей Александрович, канд. техн. наук, доцент, Россия, Тула, Тульский государственный университет

PRODUCTION OF CASINGS BY REVERSE EXTRUSION METHOD

A.I. Gasanov

Research and computer simulations in the field of stamping of metal parts have become an integral part of product development and production. This article discusses the need for research and the use of computer simulations in the field of metal forming. The article describes the main advantages and features of research into metal forming processes using the computer modeling method. The paper also presents the results of a study of the reverse extrusion operation using mathematical modeling when using die equipment of different shapes. Data are provided on technological force, intensity of stresses and deformations, tensile and compressive stresses. The work also provides a graph of the technological force of reverse extrusion and draws conclusions based on the data obtained about the influence of the tool shape on the stress and deformation state.

Key words: metal forming, computer simulations, reverse extrusion, technological force, stress intensity, average stress.

Gasanov Abbas Isa ogly, student, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Scientific advisor: Pasynkov Andrej Aleksandrovich, candidate of technical science, docent, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.77
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-356-357

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОЛУФАБРИКАТА МЕТОДОВ ВЫСАДКИ

И.В. Гребенщиков

Математическое моделирование является мощным и современным инструментом, который позволяет изучать, улучшать и оптимизировать различные процессы, включая, например, процессы обработки металлов давлением. В данной статье рассматривается вопрос о том, как математическое моделирование используется при исследовании процессов ковки и штамповки, и как этот метод помогает в достижении результатов и повышении качества изготавливаемых деталей. Приводятся основные компьютерные программные обеспечения, которые основаны на методах математического анализа. Также в работе описываются основные результаты проделанного исследования процесса высадки с помощью создания и анализа модели. Приводятся трехмерные изображения распределения средних напряжений и интенсивности напряжений в полуфабрикатах. Проводятся исследования влияния температуры на поля напряжений во всем объеме материала, а также в трассируемых точках. Делаются выводы о том, как влияет температура алюминиевого сплава на распределения и максимальные значения интенсивности напряжений и средних напряжений.

Ключевые слова: процесс высадки, средние напряжения, интенсивность напряжений, трассируемая точка, компьютерное моделирование, обработка металлов давлением.

Процессы обработки металлов давлением, такие как штамповка, основаны на применении внешней силы к заготовке с целью изменения ее формы и размеров [1-3]. Важно отметить, что при таких процессах можно использовать разные модели материала, например, жестко-пластическую, упруго-пластическую, вязко-пластическую и иные, что создает сложности при их моделировании и анализе [4-5].

Математическое моделирование позволяет описать процессы обработки металлов давлением с использованием уравнений, которые учитывают физические свойства материала, геометрию детали, параметры обработки и условия внешнего давления. Модели могут быть разработаны для конкретных процессов и металлических сплавов, что позволяет изменять различные параметры и оценивать их влияние на результаты процесса.

Основными преимуществами использования математического моделирования при исследовании процессов обработки металлов давлением являются:

1. Экономия времени и ресурсов: моделирование позволяет исследователям проводить виртуальные эксперименты, что позволяет сократить количество физических испытаний и экспериментов, требующих затраты времени и ресурсов.

2. Оптимизация процесса: с помощью моделирования возможно определить оптимальные параметры обработки, такие как скорость деформации, температура, режимы трения и т. д. Это позволяет достичь лучших результатов и повысить эффективность производства.

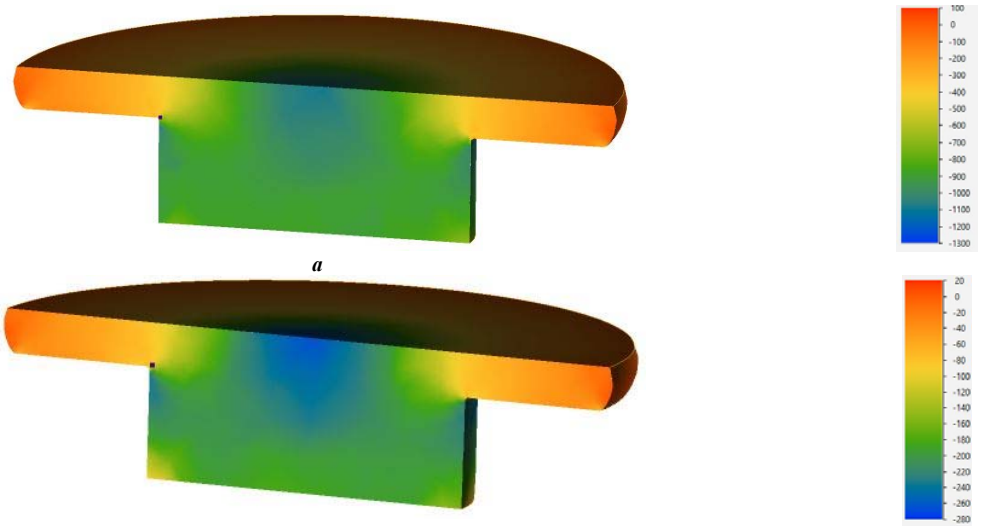
3. Предсказание деформаций и напряжений: моделирование позволяет оценить напряженно-деформированное состояние, возникающее в металле во время обработки давлением.

4. Улучшение качества продукции: математическое моделирование позволяет предсказывать и анализировать возможные дефекты и неоднородности, которые могут возникнуть в результате обработки металлов давлением. Это позволяет улучшить качество продукции и снизить количество брака.

Наиболее популярным в настоящее время методом математического анализа является метод конечных элементов [6-7], на котором основано множество программных комплексов, включая QForm [8-9], который в настоящее время стал одним из наиболее встречаемых инструментов при проведении исследований. Также и данная работа основана на результатах компьютерного моделирования, которое было проведено в этой программе.

Исследовалось влияние температуры штамповки на напряженное состояние материала в процессе его высадки, при этом заготовка выполнена из алюминиевого сплава и представляет собой цилиндр. Таким образом были получены распределения средних напряжений (рис. 1) и интенсивности напряжений (рис. 2) при высадке.

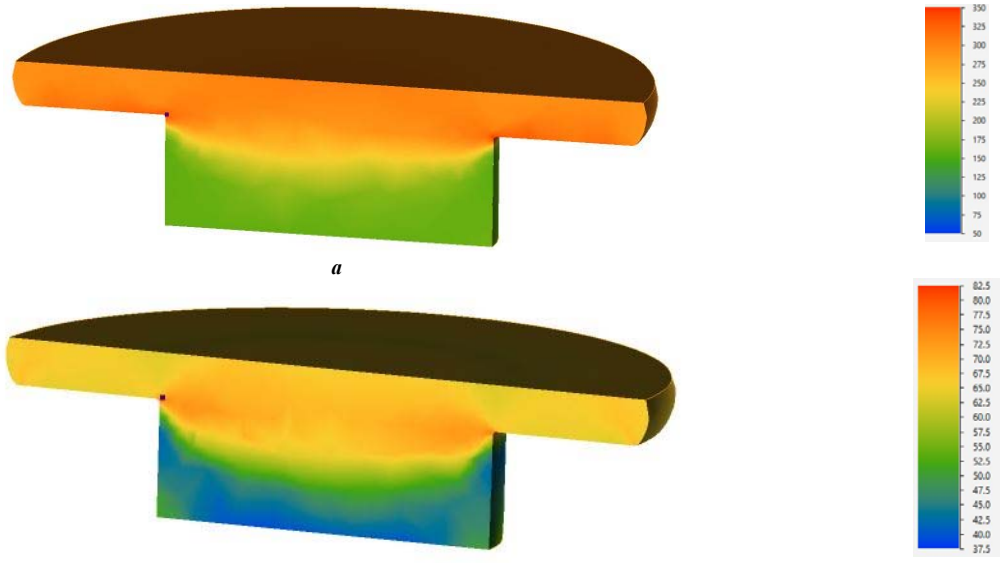
По данным результатам моделирования было определено следующее, что на центральной части изделия преобладают сжимающие напряжения, при этом их величина больше в случае холодного деформирования, при горячем же формоизменении их величина уменьшается практически в 5 раз. Аналогичная ситуация происходит при оценке растягивающих напряжений во фланцевой части изделия, в этом случае наблюдается практически пятикратная разница в пиковых значениях напряжений.



а

б

Рис. 1. Распределение средних напряжений при температуре 20°С (а) и 500°С (б)



а

б

Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений при температуре 20°С (а) и 500°С (б)

Основная часть напряжений наблюдается в верхней зоне полуфабриката, при этом максимальные значения отличаются почти на 400%. Однако основной интерес представляет зона перехода во фланцевую часть, поэтому для этой части изделия было проведено исследование интенсивности напряжений по принципу трассируемой точки (рис. 3).

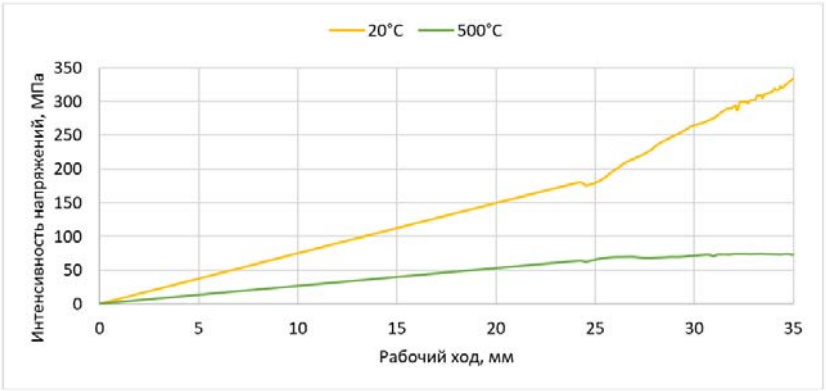


Рис. 3. Интенсивность напряжений в трассируемой точке

Установлено, что в трассируемой точке также наблюдается значительная разница в максимальной величине интенсивности напряжений, так при горячем формоизменении напряжения меньше практически в 8 раз, относительно холодного деформирования.

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. М.: Машиностроение, 2010. 732 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Изд. 5-е, перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1979, 520 с.
3. 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.
4. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 424 с.
5. Теория обработки металлов давлением / Учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь / Под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.
6. Дмитриев А. М., Воронцов А. Л. Надежность метода конечных элементов // Справочник. Инженерный журнал. 2004. №6. С. 12-13.
7. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении / Тихонов А.Н. и др. М.: Машиностроение, 1990. 264 с.
8. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
9. QForm 2D/3D Программа для моделирования процессов обработки металлов давлением Версия VX. Часть 2. Руководство пользователя. «КванторФорм», 2018. 431 с.

Гребенщиков Иван Владимирович, студент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Научный руководитель: Коротков Виктор Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Россия, Тула, Тульский государственный университет

RESEARCH OF OBTAINING SEMI-FINISHED METAL PRODUCT BY PLANTING METHODS

I.V. Grebenschickov

Mathematical modeling is a powerful and modern tool that allows you to study, improve and optimize various processes, including, for example, metal forming processes. This article discusses how mathematical modeling is used in the study of forging and stamping processes, and how this method helps in achieving results and improving the quality of manufactured parts. The basic computer software, which is based on methods of mathematical analysis, is presented. The paper also describes the main results of the study of the landing process using the creation and analysis of the model. Three-dimensional images of the distribution of average stresses and stress intensity in semi-finished products are provided. Research is being carried out on the influence of temperature on stress fields throughout the entire volume of the material, as well as at traced points. Conclusions are drawn about how the temperature of the aluminum alloy affects the distributions and maximum values of stress intensity and average stress.

Key words: upsetting process, average stresses, stress intensity, traced point, computer modeling, metal forming.

Grebenschickov Ivan Vladimirovich, 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 621.7
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-358-359

ОЦЕНКА СИЛ ВЫСАДКИ ПУСТОТЕЛЫХ ТИТАНОВЫХ ОБОЛОЧЕК

И.С. Хрычев, А.В. Харченко

При осадке концевых элементов титановых пустотелых оболочек возникают значительные сжимающие напряжения в осаживаемой части наряду с растягивающими напряжениями на краевой поверхности. Силовые нагрузки, необходимые для реализации процесса деформирования заготовок из высокопрочных материалов, могут достигать огромных величин. Ввиду этого, для снижения неравномерности напряженного состояния и снижения силовых нагрузок, производится нагрев материала заготовки и деформирование с регламентированной скоростью. В статье выполнено моделирование высадки с целью оценки изменения силовых нагрузок при деформировании нагретой оболочки с малыми скоростями деформирования.

Ключевые слова: высадка, моделирование, формоизменение, сила, деформации.

В статье рассмотрен процесс получения утолщенных с торца пустотелых оболочек. Утолщения формируются осадкой посредством давления рабочего инструмента на торец трубы. Внутренняя поверхность полой заготовки контактирует с оправкой, препятствующей деформации заготовки в сторону ее оси. Схема процесса приведена на рис. 1. При реализации процесса осадки краевых элементов титановых пустотелых оболочек в холодном состоянии возникают значительные силовые нагрузки. Ввиду этого для снижения неравномерности напряженного состояния и снижения силовых нагрузок производится нагрев материала заготовки. В качестве заготовки под высадку принималась труба со следующими размерами: диаметр 60 мм, толщина стенки t=3…7 мм. Величина рабочего хода составляла 12 мм. Начальное расстояние между инструментами 20 мм. Материал заготовки титановый сплав ВТ6. Температура нагрева $900°C$. Скорость перемещения нажимного пуансона V =1…15 мм/мин. Коэффициент трения 0,3. Было выполнено моделирование в программном комплексе DEFORM при разных скоростях деформирования и толщин стенок заготовки.

На рис. 1 представлены схемы высадки на начальном и заключительном этапах воздействия рабочего инструмента на заготовку.

На рис. 2 представлен график изменения силы в процессе высадке для рабочего хода инструмента 16 мм при начальном расстоянии между опорными поверхностями 20 мм.

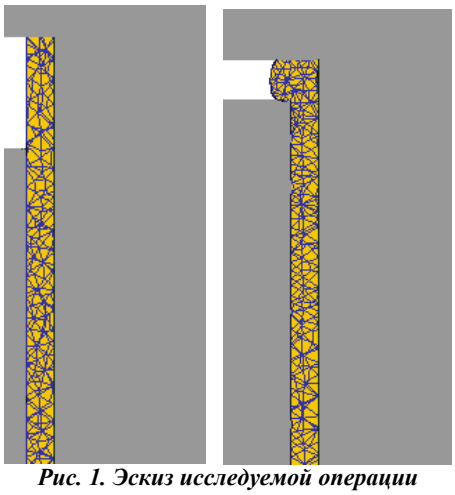


Рис. 1. Эскиз исследуемой операции

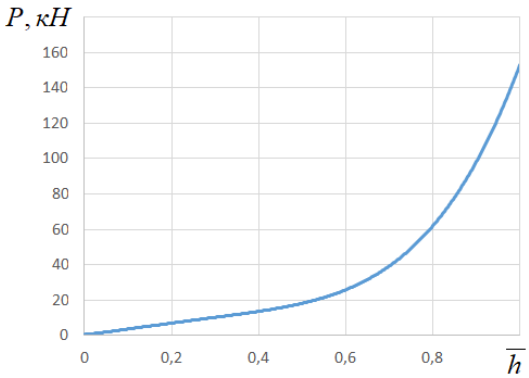
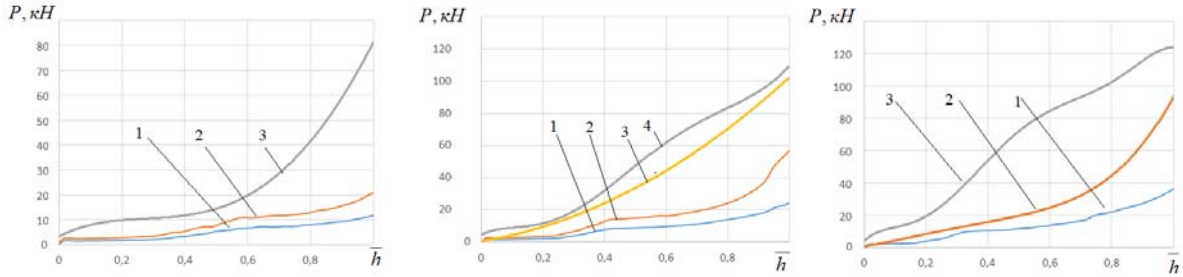


Рис. 2. К оценке изменения силы высадки трубной заготовки со степенью деформации 80 %

Из полученного графика изменения силовой характеристики можно увидеть, что основной рост силы операции происходит на последней трети хода инструмента. Это связано с увеличением площади контакта между заготовкой и инструментом, ведущему как к увеличению деформирующих сил, так и сил трения. Увеличение степени деформации заготовки при данной схеме деформирования может ограничиваться номинальной силой применяемого оборудования и стойкостью оснастки. Поэтому для оценки возможности снижения деформирующих сил необходимо исследование влияния различных технологических факторов.

На рис. 3 представлен график изменения силы в процессе высадке при скоростях деформирования $V = 1$ мм/мин, $V = 5$ мм/мин, $V = 10$ мм/мин толщинах стенок заготовки $t = 3$ мм, $t = 5$ мм, $t = 7$ мм.



а ***б*** ***в***

Рис. 3. К оценке изменения силы высадки трубных заготовок разных толщин: а - $t = 3$ мм; б - $t = 5$ мм; в - $t = 7$ мм; 1 - $V = 1$ мм/мин; 2 - $V = 5$ мм/мин; 3 - $V = 10$ мм/мин

Из графических зависимостей, приведенных на рис. 3 видно, что минимальной силе операции высадки фланцевого утолщения соответствует минимальная начальная толщина заготовки и минимальная скорость перемещения нажимного пуансона. Изменение начальной толщины заготовки от 3 до 7 мм приводит увеличению технологической силы на 30…40%, а рост скорости деформирования от 1 до 10 мм/мин увеличивает силовую характеристику в 5…7 раз. Наиболее существенное влияние скорости просматривается при ее больших значениях.

На рис. 4 представлен график изменения силы операции высадки утолщения от скорости деформирования и толщины стенки заготовки.

Графические зависимости изменения силы операции, показанные на рис. 4, позволяют провести подбор необходимого технологического оборудования при заданной начальной толщине заготовки и ее степени деформации.

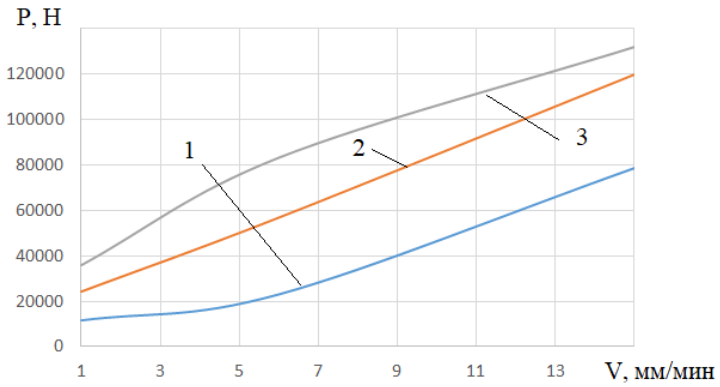


Рис. 4. График изменения сил на ползуне от скорости деформирования: 1 - $t = 3$ ***мм; 2 -*** $t = 5$ ***мм; 3 -*** $t = 7$ ***мм***

Вывод. Снижение силы высадки фланцевого утолщения возможно путем уменьшения скорости перемещения ползуна пресса. Данное явление связано со скоростью протекания разупрочняющих процессов в материале заготовки при заданной температуре деформирования.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 23-29-00470.

Список использованной 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. Alves L.M., Afonso R.M., Silva C.M.A., Martins P.A.F. Boss forming of annular flanges in thin-walled tubes. Journal of Materials Processing Technology. 2017, Volume 250. P. 182-189.

9. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. М., Металлургия, 1976. 488 с.

Хрычев Иван Сергеевич, студент, sulee@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Харченко Антон Витальевич, студент, Россия, Тула, Тульский государственный университет

EVALUATION OF THE LANDING FORCES OF HOLLOW TITANIUM SHELLS

I.S. Khrychev, A.V. Kharchenko

When the end elements of titanium hollow shells are deposited, significant compressive stresses occur in the deposited part along with tensile stresses on the edge surface. The force loads required to implement the deformation process of workpieces made of high-strength materials can reach enormous values. In view of this, in order to reduce the unevenness of the stress state and reduce power loads, the workpiece material is heated and deformed at a regulated speed. The article simulates the landing in order to assess the change in force loads during deformation of the heated shell with low deformation rates.

Key words: landing, modeling, shape change, force, deformation.

Khrychev Ivan Sergeevich, student, sulee@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kharchenko Anton Vitalievich, student, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7.043
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-361-362

РАЗРАБОТКА НОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Л.В. Каркач

В последние годы все большее внимание уделяется импульсным методам обработки металлических изделий, которые основаны на использовании импульсной энергии и позволяют достичь высокой скорости и точности штамповки. Так в настоящее время активно используется магнитно-импульсная обработка металлов, которая основана на использовании импульсного магнитного поля. Такая технология имеет ряд недостатков, которые описаны и рассмотрены в данной статье. Также описываются основные направления применения магнитно-импульсных технологий в контексте штамповки. Также в работе предложена новая конструкция устройства для листовой штамповки, которая основана на создании рабочего хода за счет импульсного магнитного поля. Приводится сама конструкция, описываются ее особенности и преимущества нового подхода для штамповки металлических изделий. Делаются выводы о возможностях и перспективах использования нового устройства.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, штамповочное производство, новое устройство, магнитное поле, импульсная штамповка, листовая штамповка.

В последние годы все большее внимание уделяется импульсным методам обработки металлических изделий [1]. Эти методы основаны на использовании импульсной энергии и позволяют достичь высокой скорости и точности обработки [2]. Их особенностью является применение высокого давления для формирования металлических изделий, при этом давление может быть разной природы, так выделяют несколько видов такой штамповки [3-4]:

- Магнитно-импульсная обработка за счет энергии магнитного поля.
- Штамповка взрывом за счет энергии газов.
- Штамповка газовой смесью.
- Электрогидравлическая штамповка за счет давления, создаваемого жидкость при создании в ней разряда электрического тока.

Магнитно-импульсная обработка металла (МИОМ) — это современный метод обработки металлов, который основан дна том, что давление на металлическую формоизменяемую заготовку создается за счет воздействия магнитного поля [5-6]. МИОМ применяется в различных отраслях, таких как автомобильное производство, аэрокосмическая отрасль, машиностроение и другие. МИОМ основана на мгновенном разряде электроэнергии, накопленной в батарее, через индуктор, при этом заготовку помещают в большинстве случае на оправку или внутрь оправки [7-8]. В результате получаемой кинетической энергии, материал принимает форму оправки, точно повторяя ее контуры. Чаще всего с помощью МИОМ выполняются такие операции как обжим, раздача, сборка [9].

Этот метод позволяет создавать продукцию с минимальным уровнем отклонений от заданных размеров и форм. Кроме того, МИОМ обладает высокой производительностью, обеспечивая ускоренный цикл обработки, что является важным фактором для массового производства. Еще одним преимуществом МИОМ является возможность формирования сложных геометрических форм, которые традиционные методы штамповки или литья не могут обеспечить. Важным преимуществом МИОМ является его экономическая эффективность. Метод позволяет в некоторых случаях сократить количество необходимых операций обработки металла, что в свою очередь снижает затраты на производство. Однако, несмотря на все преимущества, МИОМ также имеет свои недостатки и ограничения. Он неприменим для обработки некоторых металлов, в том числе отсутствует возможность или технология слишком сложна для осуществления вырубки, пробивки, глубокой вытяжки, гибки и некоторых других операций.

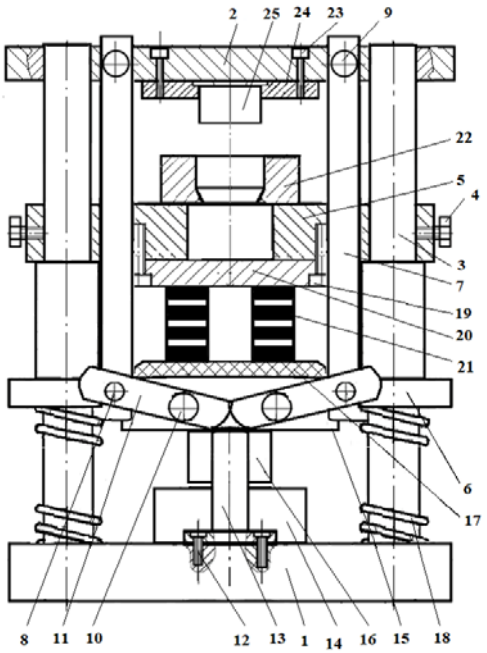


Рис. 1. Схема устройства

Поэтому было разработано новое устройство, которое позволяет за счет исполнительного динамического механизма, через который проходит разряд электрического тока, осуществлять одновременно несколько операций (рис. 1, рис. 2) [10]. На данное устройство был получен патент на полезную модель, в котором указаны конструктивные особенности технического решения [10]: «содержит нижнюю плиту 1 и верхнюю промежуточную плиту 2, стойки 3 с закрепленной на них винтами 4 верхнюю плиту 5. На нижней ступени стоек 3 расположена с возможностью перемещения подпружиненная нижняя промежуточная плита 6. Верхняя промежуточная плита 2 и подпружиненная нижняя промежуточная плита 6 связаны тягами 7 посредством осей 8 и 9. Кроме того, на осях 8 и 10 установлены двуплечие рычаги 11. На нижней плите 1 закреплены винтами 12 упоры 13, матрица 14, например для вырубки. На подпружиненной нижней промежуточной плите 6 закреплен пуансонодержатель 15 с пуансоном 16, прокладка 17. Между подпружиненной нижней промежуточной плитой 6 и нижней плитой 1 на нижней ступени стойки 3 установлены пружины 18. На верхней плите 5 винтами 19 зафиксирована опорная плита 20, и исполнительный динамический механизм 21, матрица 22, например, для обжима. На верхней промежуточной плите 2 винтами 23 закреплен пуансонодержатель 24 и пуансон 25.» [10].

В целом устройство работает за счет исполнительного динамического механизма, вместо привычно неподвижного индуктора. Так при разряде в механизме происходит взаимное отталкивание друг от друга его частей, что приводит все устройство в движение, и осуществляется передача движения в конечном счете на пунсоны, которые расположены в верхней и нижней частях устройства.

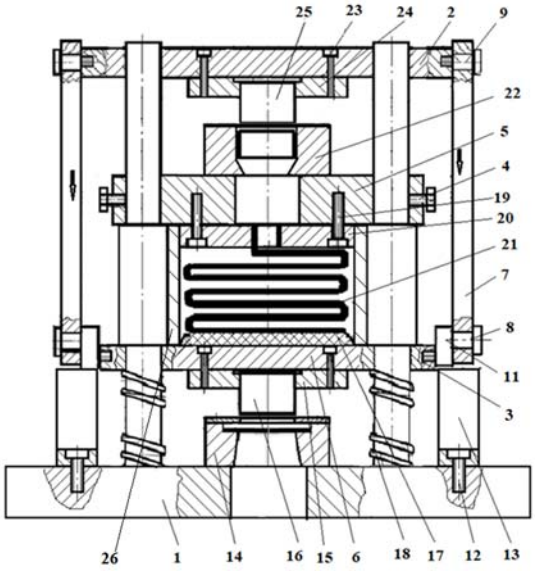


Рис. 2. Схема устройства

Таким образом за счет рычажной системы происходит передача кинетической энергии сразу на два инструмента, что позволяет не только увеличить производительность, но и осуществлять формоизменяющие и разделительные операции, такие как вырубка, пробивка, гибка, вытяжка, обжим, раздача и другие виды листовой штамповки, при этом также важным достоинством устройства является возможность штамповать листовые заготовки из практически любых материалов.

Список литературы

1. Овчаренко А. Г., Козлюк А. Ю. Эффективная магнитно-импульсная обработка металлорежущего инструмента // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2009. № 1(42). С. 4-7. EDN JYAMAJ.

2. Степанов В.Г., Шавров И.А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. Л., Машиностроение, 1975. 278 с.

3. Баранов М. И. Прогрессивные импульсные технологии обработки материалов: история, физические основы и технические возможности // Электротехника и электромеханика. 2009. № 1. С. 42-51. EDN QCPABC.

4. Технология магнитно-импульсной обработки материалов / В. А. Глущенков [и др.]. Самара: Издательский дом «Федоров», 2014. 208 с.

5. Батыгин Ю. В., Сериков Г. С., Чаплыгин Е. А. Реализация и перспективы магнитно-импульсных методов в развитии передовых технологий современности // Автомобильный транспорт (Харьков). 2006. № 18. С. 83-87. EDN NCDPSX.

6. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Магнитно-импульсная обработка металлов. Харьков. МОСТ-Торнадо, 2002. 228с.

7. Кухарь В. Д., Маленичев Е. С. Разработка математических моделей для анализа процессов магнитно-импульсной штамповки продольных выступов на трубчатых деталях // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 1. С. 218-223. EDN YICHNP.

8. Яковлев С. С., Яковлев Б. С. Новые устройства для осуществления штамповки импульсным магнитным полем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 4. С. 475-478. EDN EFCOVZ.

9. Глущенков В.А., Стукалов С.А. Особенности магнитно-импульсной штамповки тонкостенных трубчатых деталей сложной формы // Кузнечно-штамповочное производство. 1966. № 10. С. 18-23.

10. 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.

Каркач Леонид Витальевич, магистрант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Научный руководитель: Пасынков Андрей Александрович, канд. техн. наук, доцент, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DEVELOPMENT OF A NEW DEVICE FOR PULSE SHEET STAMPING

L.V. Karkach

In recent years, increasing attention has been paid to pulsed processing methods of metal products, which are based on the use of pulsed energy and allow achieving high speed and accuracy of stamping. Thus, magnetic-pulse processing of metals, which is based on the use of a pulsed magnetic field, is currently actively used. This technology has a number of disadvantages, which are described and discussed in this article. The main areas of application of magnetic pulse technologies in the context of stamping are also described. The work also proposes a new design of a device for sheet stamping, which is based on the creation of a working stroke due to a pulsed magnetic field. The design itself is presented, its features and the advantages of a new approach for stamping metal products are described. Conclusions are drawn about the possibilities and prospects for using the new device.

Key words: magnetic pulse processing of metals, stamping production, new device, magnetic field, pulse stamping, sheet stamping.

Karkach Leonid Vitalevich, undergraduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Scientific advisor: Pasynkov Andrej Aleksandrovich, candidate of technical science, docent, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.98:539.376
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-363-364

ВЕРХНЕГРАНИЧНЫЙ РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И СИЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОСАДКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ

С.Н. Ларин, П.В. Романов

Технология сварки давлением применяется при создании монолитного соединения элементов, образующих единую конструкцию путем пластической осадки входящих в ее состав элементов. Данная технология особенно эффективна при изготовлении сложных изделий, выполненных из высокопрочных труднодеформируемых материалов, например, алюминиевых и титановых сплавов. В работе приведена математическая модель расчета энергетическим методом величины давления горячей осадки заготовок при сварке давлением. Принята осесимметричная схема деформирования. Предполагается, что осадка осуществляется в условиях жестко-пластичности. Выполнен учет нестационарности деформирования, связанный с поворотом линий разрыва скорости. Приведены расчетные данные и результаты расчетов.

Ключевые слова: осадка, давление, деформации, мощность деформирования.

При сборке изделий специального назначения из труднодеформируемых материалов часто применяют технологию сварки давлением входящих в них деталей [1-4]. Процесс сварки давлением реализуется с нагревом в диапазоне температур $0{,}4...0{,}6\,T_{пл}$, т.е. в твердой фазе, что обеспечивает получение качественного соединения элементов конструкции с повышенной прочностью и герметичностью [5-6]. Процесс сварки включает в себя два этапа: пластическое сжатие деталей (осадка) и выдержка под давлением (ползучесть).

Схема процесса формоизменения приведена на рис. 1, а. Осадка осуществляется кратковременно, материал заготовок, входящих в конструкцию, жестко-пластичный, его состоянию соответствует уравнение

$$\sigma_e = A\varepsilon_e^m, \tag{1}$$

где σ_e, ε_e – эквивалентное напряжение и деформации; A, m – константы упрочнения материала определяемые экспериментально.

Для расчета режимов осадки воспользуемся энергетическим методом, широко используемым в теории обработки материалов давлением [3]. В соответствии с этим методом справедлива верхнеграничная теорема, которая выражается энергетическим уравнением равновесия

$$N \le N_Д + \sum N_p \,. \tag{2}$$

Здесь $N, N_Д, N_p$ – соответственно величины мощностей: внешних сил, деформирования и на разрывных поверхностях.

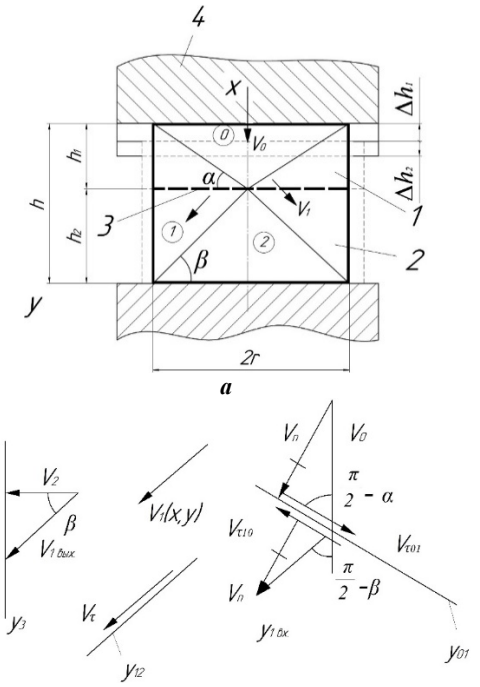


Рис. 1. Модель осадки заготовок, деформационное поле (а), годограф скоростей перемещений деформационных блоков (б): 1, 2 – соединяемые заготовки; 3 – поверхность соединения; 4 – нажимная плита

Для расчета мощностей на поверхностях разрыва (2) необходимо определить кинематику формоизменения, для чего привлечем годограф скоростей перемещений деформационных блоков [4]. Схема расположения векторов скоростей приведена на рис. 1, б. Деформационное поле скоростей кинематически допустимо и состоит из жестких «0», «2» и деформационного блока «1». Выделенные области разделены разрывными поверхностями скорости (сформированы линиями y_{01}, y_{02} в продольном сечении полуфабриката). Формообразование осуществляется в пластическом блоке «1» и на граничных поверхностях скоростей. Геометрическая схема формообразования обладает осевой симметрией.

Скорость движения точек в деформационном блоке определим, воспользовавшись годографом приведенном на рис. 1, б, в виде

$$V_1 = V_0\left[1+\frac{k(y-y_{01})}{y_{01}-r}\right]\frac{\cos\alpha}{\sin(\alpha+\beta)}, \tag{3}$$

где

$$k = 1-\frac{r\cdot\sin(\alpha+\beta)}{2h\cdot\cos\alpha\cdot\cos\beta};$$

r, h - исходные размеры заготовок, V_0 - скорость перемещения нажимного инструмента.

Функция удовлетворяет условиям на границах деформационного блока

$$\left.\begin{aligned} V_{1вх.} &= \frac{V_0\cos\alpha}{\sin(\alpha+\beta)} \quad \text{при} \quad y = y_{01} = (x-h)\cdot ctg\alpha + r; \\ V_{1вых.} &= \frac{rV_0}{2h\cos\beta} \quad \text{при} \quad y = r. \end{aligned}\right\}$$

Скорости на входе в деформационный блок и выходе из него обозначены как $V_{1вх.}$ и $V_{1вых.}$. Компоненты скоростей формообразования в пластической области записаны в виде:

$$\xi_x = \frac{\partial V_{1x}}{\partial x} = \frac{\partial V_1}{\partial x}\sin\beta;\quad \xi_y = \frac{\partial V_{1y}}{\partial y} = \frac{\partial V_1}{\partial y}\cos\beta;\quad \xi_\varphi = -\xi_x - \xi_y;$$

$$\xi_{xy} = \frac{\partial V_{1x}}{\partial y} + \frac{\partial V_{1y}}{\partial x} = \frac{\partial V_1}{\partial y}\sin\beta + \frac{\partial V_1}{\partial x}\cos\beta\cdot$$

Выразим эквивалентные скорость деформаций и деформацию через компоненты скоростей формообразования

$$\xi_e = \frac{1}{\sqrt{3}}\left[2\left(\xi_x^2+\xi_y^2+\xi_\varphi^2\right)+\xi_{xy}^2\right]^{1/2}; \tag{4}$$

$$\varepsilon_e = \xi_e t = \frac{\Delta h_1}{V_0}\xi_e, \tag{5}$$

где Δh_1 - величина осадки при пластическом деформировании.

Выражение для эквивалентного напряжения в блоке деформаций определим через уравнение состояния (1).

$$\sigma_e = A\left(\frac{\Delta h_1}{V_0}\xi_e\right)^m, \tag{6}$$

где эквивалентная скорость деформаций ξ_e определяется по выражению (4). Значение мощности в блоке определим, используя соотношения (4) – (6):

$$N_Д = \int \sigma_e \xi_e dw = 2\pi A\left(\frac{\Delta h_1}{V_0}\right)^m y_{ц.т.} \int_0^h \left(\int_{y_{01}}^{y_3} \xi_e^{1+m} dy\right) dx, \tag{7}$$

где $y_{ц.т.} = \frac{2}{3}r$ - ордината центра тяжести треугольной площади сечения деформационного блока.

На поверхности «01» разрыва, в соответствии с планом скоростей (рис. 1, б), определим касательную и нормальную составляющие скорости:

$$\left.\begin{aligned} V_\tau = V_{\tau 01} + V_{\tau 10} = V_0\left[tg\alpha + ctg(\alpha+\beta)\right]\cos\alpha, \\ V_n = V_0\cos\alpha. \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Получим соотношения для эквивалентной деформации и напряжения с учетом зависимости (8) и уравнения состояния (1):

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_e = \frac{V_\tau}{\sqrt{3}V_n} = \frac{1}{\sqrt{3}}(tg\alpha + ctg(\alpha+\beta)); \\ \sigma_e = \left[\frac{1}{\sqrt{3}}(tg\alpha + ctg(\alpha+\beta))\right]^m. \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

Выразим мощность на поверхности «01», принимая во внимание соотношения (8), (9):

$$N_{01} = \frac{1}{\sqrt{3}}\int \sigma_e V_\tau ds = \frac{\pi A r^2}{\cos\alpha} V_0 \left[\frac{1}{\sqrt{3}}(tg\alpha + ctg(\alpha+\beta))\right]^{1+m}. \tag{10}$$

На поверхности разрыва скорости «12» с учетом с плана скоростей запишем

$$V_\tau = V_1 \quad \text{при} \quad y = y_{12}; \quad V_n = 0. \tag{11}$$

Эквивалентные деформацию и напряжение запишем с учетом зависимости (11) и уравнения состояния (1):

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_e = \frac{\Delta h_1 V_\tau}{\sqrt{3}V_0 l_{12}} = \frac{\Delta h_1 \cos\beta}{\sqrt{3}rV_0} V_\tau; \\ \sigma_e = A\left(\frac{\Delta h_1 \cos\beta}{\sqrt{3}rV_0} V_\tau\right)^m. \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

Мощность на поверхности разрыва «12» получим, учитывая выражения (11), (12):

$$N_{12} = \pi A r^{1-m} (\cos\beta)^m \left(\frac{\Delta h_1}{\sqrt{3}V_0}\right)^{1+m} \int_0^{h_2} V_1|_{y=y_{12}} dx, \tag{13}$$

где $y_{12} = -x \cdot ctg\beta + r$ - уравнение образующей.

Величину давления осадки выразим, подставив выражений (7), (10), (13) в неравенство (2), таким образом получаем

$$q \le \frac{N_Д + N_{01} + N_{12}}{\pi r^2 V_0}. \tag{14}$$

Как видно из полученного выражения, давление осадки зависит от степени деформации и упрочнения материала заготовки.

Проведем расчет операции с учетом нестационарности деформирования при осадке [5]. Нестационарность процесса связана с трансформацией схемы скоростей деформаций. Линии разрыва скорости поворачиваются в течение процесса осадки, углы α и β изменяются, приводя к возникновению дополнительных нормальных скоростей на этих линиях. На линиях y_{01} и y_{12} получим следующие соотношения:

$$\left.\begin{aligned} V^*_{n01} &= l_{01}\frac{d\alpha}{dt} = l_{01}\frac{d}{dt}arctg\frac{h_1}{r} = \frac{r_0}{\left[1+\left(\frac{h_1}{r}\right)^2\right]\cos\alpha}; \\ V^*_{n12} &= l_{12}\frac{d\beta}{dt} = l_{12}\frac{d}{dt}arctg\frac{h_2}{r} = \frac{r_0}{\left[1+\left(\frac{h_2}{r}\right)^2\right]\cos\beta}, \end{aligned}\right\} \quad (15)$$

где $l_{01} = \frac{r}{\cos\alpha}$; $l_{12} = \frac{r}{\cos\beta}$; $h_1 = r\cdot tg\alpha$; $h_2 = r\cdot tg\beta$.

С учетом выражений (15), (8), (11), эквивалентные деформации на линиях разрыва скорости преобразуются к виду:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_{e01} &= \frac{V_\tau}{\sqrt{3}(V_n + V^*_{n01})} = \frac{1}{\sqrt{3}k_1}\left[tg\alpha + ctg(\alpha+\beta)\right]; \\ \varepsilon_{e12}\,\frac{V_\tau}{\sqrt{3}V^*_{n12}} &= \frac{k_2}{\sqrt{3}V_0}V_{1\ y=y_{12}}. \end{aligned}\right\} \quad (16)$$

Здесь

$$k_1 = 1 + \frac{1}{\left[1+\left(\frac{h_1}{r}\right)^2\right]\cos^2\alpha}; \quad k_2 = \left[1+\left(\frac{h_2}{r}\right)^2\right]\cos\beta.$$

Сумма мощностей деформирования на этих поверхностях примет следующий вид

$$\sum N_p = N_{01} + N_{12} = \frac{\pi A r^2}{\sqrt{3}}\left\{\frac{\varepsilon^m_{e01}}{\cos\alpha}\left[tg\alpha + ctg(\alpha+\beta)\right] + \frac{\varepsilon^m_{e12}}{\cos\beta}\int_0^{h_2} V_{1|y=y_{12}}\,dx\right\}. \quad (17)$$

Давление определяется зависимостью (14) при числителе (7) и (17). Выдержка набора заготовок под давлением обеспечивает диффузионное соединение (сварку) заготовок с образованием общих зерен на контактной поверхности [2].

Расчеты выполнены для осадки заготовок из сплавов АМг6 и ВТ14 [6-8]. Константы материалов приведены в таблице.

Механические характеристики материалов

Сплав	Температура деформирования, ^{0}C	Константы материала	
		A, МПа	m
АМг6	530	55	0.1
ВТ14	900	60	0.05

Приняты размеры: $h = 50$ мм; $2r = 30$ мм; $h_1 = 20$ мм; $h_2 = 30$ мм; $\Delta h_1 = 5$ мм; $\Delta h_2 = 2$ мм.

Давление осадки заготовок, рассчитанное без учета и с учетом нестационарности деформирования, составило соответственно:

- $q = 59.2$ и $q = 56.8$ МПа для заготовок из алюминиевого сплава;
- $q = 67.9$ и $q = 63.5$ МПа для заготовок из титанового сплава;

Вывод. Разработанная математическая модель процесса осадки заготовок в условиях жесткопластического деформирования позволяет определить величину технологического давления, необходимого для проведения операции осадки-сварки. Расчет осадки по схеме осесимметричного деформирования с учетом нестационарности поля скоростей перемещений показывает уровень давлений ниже на 4…8%, чем при расчетах без учета поворота линий разрыва скорости. Для образования общих зерен на контактной поверхности заготовок и обеспечения диффузионного соединения (сварки) осуществляется выдержка заготовок под давлением. Применение технологии сварки давлением позволяет снизить трудоемкость изготовления, особенно при сборке сложных, многоэлементных конструкций.

Список литературы

1. Изотермическое деформирование высокопрочных материалов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин и др. М.: Машиностроение, 2003. 427 с.

2. Платонов В.И., Романов П.В., Чудин В.Н. Расчет режимов осадки ребра на плите при их сборке // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. №9. Т.18. С. 421-424.

3. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 836 с.

4. Мышкис А.Д. Лекции по высшей математике: Спб., «Лань». 2007. 688 с.

5. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. Спб., «Лань». 2010. 400 с.

6. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. - М.: Металлургия, 1973. 224 с.

7. Черняев А.В., Усенко Н.А., Коротков В.А., Платонов В.И. Определение влияния скорости деформации на сопротивление деформации при статическом растяжении при повышенной температуре // Цветные металлы. 2019. № 5. С. 60-65.

8. Демин В.А., Черняев А.В., Платонов В.И., Коротков В.А. Метод экспериментального определения механических и пластических свойств материала при растяжении при повышенной температуре // Цветные металлы. 2019. № 5. С. 66-73.

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Романов Павел Витальевич, аспирант, Россия, Тула, Тульский государственный университет

UPPER BOUNDARY CALCULATION OF DEFORMATION AND FORCE MODES OF PRECIPITATION OF AXISYMMETRIC WORKPIECES DURING PRESSURE WELDING

S.N. Larin, P.V. Romanov

Pressure welding technology is used to create a monolithic connection of elements forming a single structure by plastic precipitation of its constituent elements. This technology is especially effective in the manufacture of complex products made of high-strength, hard-to-form materials, such as aluminum and titanium alloys. The paper presents a mathematical model for calculating the pressure value of hot precipitation of workpieces during pressure welding using an energy method. An axisymmetric deformation scheme has been adopted. It is assumed that the landing is carried out in conditions of rigid plasticity. The nonstationarity of deformation associated with the rotation of the velocity discontinuity lines is taken into account. The calculated data and calculation results are presented.

Key words: sediment, pressure, deformations, deformation power.

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Romanov Pavel Vitalievich, postgraduate, Russia, Tula, Tula State University

УДК 539.374
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-367-368

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ КОРПУСНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНОК

Н.Д. Тутышкин

Приводится анализ напряженного состояния и связанных с ним силовых параметров при объемной штамповке выдавливанием корпусных осесимметричных изделий с переменной толщиной стенок. Анализ строится на основе решения системы основных уравнений, описывающей осесимметричное напряженное состояние пластического материала. Существенной новизной является введение в анализ эффективных напряжений, связанных с деформационной повреждаемостью материала штампуемых изделий. Приводятся рекомендации по выбору инструментальных сталей для изучаемого процесса объемной штамповки выдавливанием.

Ключевые слова: пластическое формообразование, деформирующий инструмент, деформационная повреждаемость, эффективные напряжения, технологическое усилие

Разработка новых технологических процессов формообразования корпусных осесимметричных изделий с переменной толщиной стенок и высокими эксплуатационными свойствами связана с анализом напряженного состояния материала обрабатываемых заготовок и полуфабрикатов, расчетом механических характеристик и технологических параметров. Для анализа напряженного состояния и связанных с ним технологических параметров используются решения системы основных уравнений, описывающей пластическое формоизменение деформируемого материала.

Напряженное состояние при пластическом формоизменении осесимметричных изделий описывается в системе цилиндрических координат r, z, θ следующими основными уравнениями [1]

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_z}{r} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{r} = 0; \quad (2)$$

$$\left(\sigma_r - \sigma_z\right)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_\theta\right)^2 + \left(\sigma_\theta - \sigma_r\right)^2 + 6\tau_{rz}^2 = 6\tau_s^2\left(e_{ij}, \chi_s\right); \quad (3)$$

где σ_r, σ_z, σ_θ, τ_{rz} — отличные от нуля компоненты тензора напряжения $T_\sigma(\sigma_{ij})$; τ_s — предел текучести при сдвиге; χ_s — параметры, связанные с деформациями e_{ij} [2] (параметры упрочнения материала [3]).

Касательные компоненты тензора $T_\sigma(\sigma_{ij})$ $\tau_{z\theta}=\tau_{\theta r}$, так как окружное напряжение σ_θ, в связи с осевой симметрией, является главным. Система (1)–(3) состоит из уравнений внутреннего равновесия (1), (2) и условия пластичности Мизеса (3).

Проведем анализ напряженного состояния и связанных с ним силовых параметров на операции объемной штамповки выдавливанием детали "корпус" (рис. 1). Материалом изделия является малоуглеродистая низколегированная сталь 10ГНА ТУ14-1-2376-78, которая в отожженном состоянии имеет временное сопротивление разрыву $\sigma_в = 471...490$ Н/мм^2, относительное удлинение $\varepsilon_{пр}$ =0,27…1,36 (27…36%).

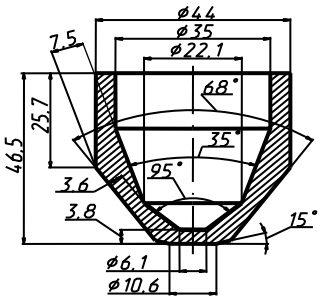


Рис. 1. Деталь «корпус»

Процесс осесимметричного пластического формоизмения является локально статически неопределимым, так как для определения четырех компонент тензора напряжения σ_r, σ_z, σ_θ, τ_{rz} имеются только три основных уравнения (1)-(3). Успешным методом решения прикладных задач осесимметричной деформации является полуобратный. Этот метод позволяет во многих процессах осесимметричной деформации сделать предположение о распределении отдельных компонент напряжений, а полученное решение привести в соответствие с «естественными» краевыми условиями или экспериментальными данными [2].

Рассматриваемый процесс выдавливания является нестационарным, так как размеры и форма пластической области в деформируемой части заготовки существенно изменяются в течение процесса. Соответственно изменяются (увеличиваются) напряжения, механические характеристики деформируемого материала и связанные с ними силовые технологические параметры. В связи с нестационарностью процесса деформирования рассматриваем его состоящим из совокупности последовательных этапов. За параметр нестационарности процесса принимаем технологическое перемещение пуансона при формообразовании полости h_n.

В данном процессе представляется возможным, в соответствии с «естественными» краевыми условиями, установить функциональную зависимость для касательного напряжения $\tau_{rz}=\tau_{rz}(r,z)$ от координат r,z в меридиональных сечениях стенок и дна оболочки от и привести, таким образом, систему уравнений в напряжениях (1)-(3) к статически определимой (относительно только трех неизвестных компонент $\sigma_r,\sigma_z,\sigma_\theta$).

Касательное напряжение $\tau_к$ на контакте деформирующего инструмента с деформируемым материалом подчиняется закону пластического трения Прандтля [4, 5]

$$\tau_к = f_n \tau_s, \tag{4}$$

где f_n - коэффициент пластического трения.

Компонента τ_{rz}, в соответствии с правилом преобразования компонент тензора напряжений [1],

$$\tau_{rz} = \tau_{\alpha\beta}\cos 2\delta_\theta = \tau_к \cos 2\delta, \tag{5}$$

где $\tau_{\alpha\beta}$ - максимальное по модулю касательное напряжение, действующее вдоль линий скольжения α, β в меридиональных сеченях гильзы $\theta = const$; α, β - два взаимно ортогональных направления, вдоль которых касательное напряжение в меридиональных сечениях стенок гильзы достигает экстремальной величины $\tau_{\alpha\beta}$; δ_θ - угол, отсчитываемый от оси z до первого направления действия компоненты $\tau_{\alpha\beta}$.

Таким образом, направления действия максимального по модулю касательного напряжения $\tau_{\alpha\beta}$ образуют в меридиональных сечениях пластического материала два семейства взаимноортогональных траекторий, совпадающих с линиями скольжения α, β и описывающихся дифференциальными уравнениями

$$\frac{dr}{dz} = tg\delta_\theta \text{ (линии α)}, \quad \frac{dr}{dz} = -ctg\delta_\theta \text{ (линии β)}. \tag{6}$$

На рис. 2 и 3 показаны пластическая область и сетка линий скольжения в меридиональном сечении деформируемого металла в начальной и заключительной стадии внедрения пуансона. При внедрении пуансона в материал заготовки на величину $h_n > 0{,}5H_n$ (где H_n – полное технологическое перемещение пуансона) пластическая область распространяется по всему

объему заготовки. Граничные условия для определения напряженного состояния металла являются довольно сложными, так как контактные границы деформирующе го инструмента в меридиональном сечении имеют сложную криволинейную форму. Положение главных осей напряжений в узловых точках пластической области устанавливается исходя из краевых условий. На оси симметрии и в ее окрестности направления главных осей совпадают с направлениями осей выбранной цилиндрической системы координат *r*, *z*, *θ*. На контакте с деформирующей поверхностью рабочего инструмента и в его окрестности ориентация главных осей 1 и 3 зависит от принятого, в соответствии с рекомендациями [6] значения коэффициента пластического трения $f_n = 0{,}5$.

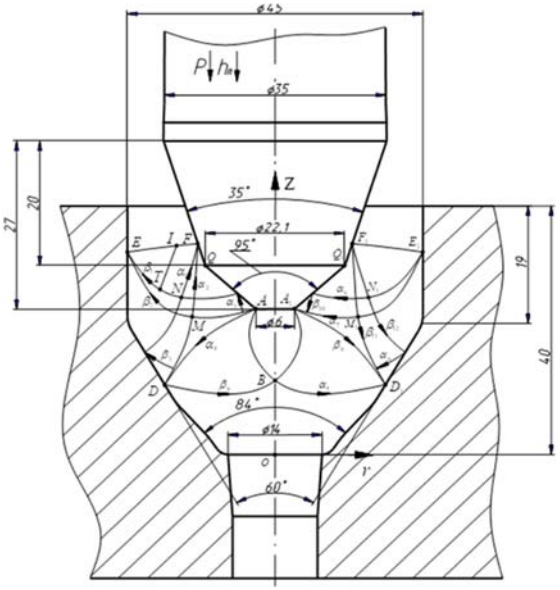


Рис. 2. Пластическая область и поле напряжений в начальной стадии формообразования выдавливанием детали "корпус"

Рассмотрим напряженное состояние материала. Пластическая область деформируемого материала на стадии развитого пластического течения при величине перемещения пуансона $h_n \geq \frac{1}{3} H_{\text{п}}$ состоит из двух характерных зон $ADBD_1A_1$ и $ADEF_1(A_1D_1E_1F_1)$ (рис. 2). В зоне $ADBD_1A_1$ происходит обжатие металла и его истечение в направлении, обратном перемещению пуансона. Установленное поле напряжений на стадии развитого пластического течения учитывает, что на стыке зон $ADBD_1A_1$ и $ADEF(A_1D_1E_1F_1)$ в криволинейном треугольнике $ADM(A_1D_1M_1)$ происходит интенсивное изменение главных нормальных напряжений, включая изменение их знака, относительно фиксированных волокон деформируемого материала. Зона $ADM(A_1D_1M_1)$ представляет собой геометрическое место изолированных линий разрыва напряжений. Установленные поля линий скольжения определяют границы $AQFEDBD_1E_1F_1Q_1A_1$ пластической области деформируемого металла для рассматриваемых стадий процесса выдавливания детали "оболочка".

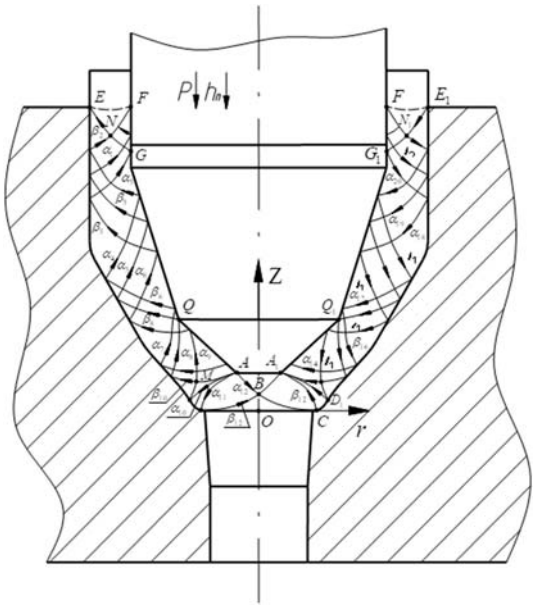


Рис. 3. Пластическая область и поле напряжений в заключительной стадии формообразования выдавливанием детали "корпус"

Известная функция распределения касательных напряжений $\tau_{rz} = \tau_{rz}(r, z)$ и ее подстановка в уравнения (1)-(3), с учетом граничных условий, позволяет получить решение для распределения напряжений $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$ по объему деформируемого материала.

Для определения технологического усилия и прогнозирования силовых условий работы инструмента большое значение имеет определение эпюры контактных напряжений. В связи с сильной нестационарностью процесса формообразованя выдавливанием деталей с переменной толщиной стенок можно прогнозировать появление зон затрудненного течения металла, образование которых резко повышает давление на контактную поверхность инструмента. Появление этих зон определяется в основном соотношением характерных размеров деформируемой заготовки, приводящим к резкому увеличению гидростатического давления, что ставит вопрос о проектировании рабочего инструмента оптимальной формы. Необходимость более точного определения контактных нагрузок связана и с тем, что они лимитируют степень формоизменения металла на операции.

Поля напряжений позволяют определить контактные нагрузки на рабочий инструмент, силу деформирования, в том числе, удельную силу выдавливания. Нормальное давление на рабочую поверхность инструмента находится путем преобразования компонент тензора напряжений:

$$\sigma_n = \sigma - \tau_s \sin(\arccos\frac{\tau_к}{\tau_s}) = \sigma - \tau_s \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_к}{\tau_s}\right)^2},$$

где n - нормаль к контактной поверхности.

Наибольшие по величине давления $\sigma_n = 2140....2750$ Н/мм^2 испытывает торцовая часть и примыкающий к нему конический участок пуансона.

Усилие деформирования

$$P = 2\pi \int_{FF_1} [\sigma_n \cos(-n, z) + \tau_k \sin(-n, z)] r ds,$$

где ds - дифференциал дуги контакта $s_{пуанс.к}$ пуансона в меридиональном сечении.

Удельное усилие выдавливания

$$\overline{p} = \frac{2}{r_F^2} \int_{FF_1} [\sigma_n \cos(-n, z) + \tau_к \sin(-n, z)] r ds.$$

На рис. 4 приведены зависимости усилия деформирования и удельного усилия выдавливания от перемещения пуансона при формообразовании детали "корпус". Как видно, процесс формообразования сопровождается нарастающим давлением в пластической области и, соответственно, интенсивным ростом технологического усилия, особенно, в заключительной стадии штамповки.

Экспериментальное определение технологического усилия деформирования производилось по замерам рабочего давления в гидросистеме пресса (по показаниям манометра). Текущие размеры полуфабриката устанавливались по перемещению пуансона с учетом условия несжимаемости деформируемого материала. Экспериментальные значения усилия деформирования превышают соответствующие теоретические на 4…6 %. Это небольшое расхождение объясняется несколько упрощенной постановкой краевых условий контактного трения, а также тем известным фактом, что допустимые поля напряжений приводят к нижней оценке удельных сил деформирования.

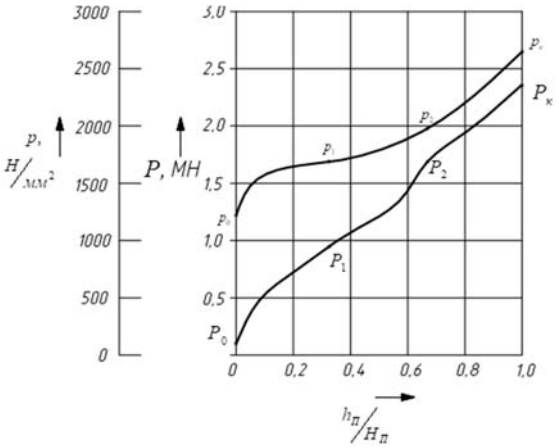


Рис. 4. Зависимость усилия деформирования и удельного усилия выдавливания от перемещения пуансона при штамповке детали "корпус"

Результаты анализа показывают, что при формообразовании детали с использованием деформирующего инструмента сложной формы происходит не только вытеснение металла из под торца пуансона, но и его обжатие при истечении в направлении, противоположном перемещению пуансона выдавливания. Это обстоятельство оказывает существенное влияние на повышение контактных давлений на инструмент.

Основным выводом приведенного анализа напряженного состояния и связанных с ним силовых параметров приведенного процесса формообразования выдавливанием корпусных осесимметричных изделий с переменной толщиной стенок является заключение о том, что параметром, лимитирующим степень формоизменения материала,

являются давления на рабочую поверхность инструмента. Поэтому очень важным является выбор инструментальной стали, способной воспринимать высокие удельные нагрузки, и в то же время обладать достаточной вязкостью. Для изготовления деформирующего инструмента рекомендуются высокопрочные инструментальные стали П9МИ, П7М, П6М3 и специальная технология его изготовления, направленная на получение устойчивой структуры материала со стабильным кубическим мартенситом и твердостью рабочей поверхностью пуансонов не ниже 60…65 HRC.

Список литературы

1. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука,1969. 420 с.
2. Комплексные задачи теории пластичности / Н.Д. Тутышкин, А.Е. Гвоздев, В.И. Трегубов и др.; Под ред. Н.Д. Тутышкина, А.Е. Гвоздева. Тула: Тул. гос. ун-т.- «Тульский полиграфист», 2001. 377 с.
3. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
4. Ивлев Д.Д. Теория идеальной пластичности. М.: Наука, 1966. 232 с.
5. Непершин Р.И. Осесимметричное прессование с малыми и большими обжатиями // Расчеты процессов пластического течения металлов. М.: Наука, 1973. С. 71-83.
6. Ковка и объемная штамповка стали. Т.1: Справочник в 2-х т. / Под ред. М.В. Сторожева. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1967. 435 с.

Тутышкин Николай Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор, nikolai.tutyshkin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF STRESSES AND FORCE PARAMETERS DURING SHAPING OF BODY AXIALLY SYMMETRIC ARTICLES WITH VARIABLE WALL THICKNESS ANALYSIS OF LANDING OPERATION OF SEMI-FINISHED PRODUCTS OF BODY AXIALLY SYMMETRIC PRODUCTS

N.D. Tutyshkin

Analysis of stress state and associated power parameters is given in the course of volumetric stamping by extrusion of body axisymmetric articles with variable wall thickness. The analysis is based on the solution of a system of basic equations describing the axisymmetric stress state of the plastic material. A significant novelty is the introduction into the analysis of the effective stresses associated with the deformation damage of the material of the stamped articles. Recommendations are given on the selection of tool steels for the studied extrusion molding process.
Key words: plastic shaping, deforming tool, deformation damage, effective stresses, technological force

Tutyshkin Nikolay Dmitrievich, doctor of technical sciences, professor, nikolai.tutyshkin@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.314
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-372-373

УПРАВЛЕНИЕ ДВОЙНОГО АКТИВНОГО МОСТА В МИКРОСЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С СОЛНЕЧНЫМИ ПАНЕЛЯМИ

Б.А. Авдеев

Рассмотрен вопрос применения современных солнечных панелей в микросетях постоянного и переменного токов. Проанализированы системы управления повышающеми преобразователями постоянного тока, работающие в точке максимальной мощности. На основе анализа была разработана своя методика управления преобразователем с гальванической развязкой типа двойной активный мост. Модель исследовалась с помощью имитационного моделирования. Приведены осциллограммы работы и выявлены пути дальнейшего совершенствования системы управления, работающей в точке максимальной мощности солнечных панелей.

Ключевые слова: солнечная панель, двойной активный мост, система управления, точка максимальной мощности.

На смену традиционной централизованной системе электроснабжения с мощными электростанциями на ископаемом топливе приходят децентрализованные умные сети электроснабжения с большим количеством местных возобновляемых источников электроэнергии, таких как солнечные панели (СП) и ветряные электростанции. Во всём мире предпринимаются усилия по интеграции возобновляемых источников с целью сохранения ископаемых полезных ресурсов, экономии и уменьшения углеродного следа. Наиболее перспективными являются СП, благодаря относительно компактным размерам и более удобным применением среди жилой застройки [1].

СП – это фотоэлектрические преобразователи, преобразующие солнечную энергию в электрическую. Существует три типа микросетей, основанных на характере генерируемого тока: сети постоянного тока, сети переменного тока и гибридные сети. Гибридные сети включают себя шины постоянного и переменного токов. Микросеть с СП имеет две (в случае микросети постоянного тока) или больше шин, где сходятся источники электроэнергии, электрическая нагрузка и системы хранения при наличии.

Для микросетей, содержащих СП, необходимо использовать преобразователи постоянного тока для сопряжения фотоэлектрического генератора с шиной постоянного тока микросети постоянного тока. Для микросетей переменного тока преобразователь постоянного тока служит для повышения напряжения, т.к. для уменьшения потерь в инверторе следует понизить ток и повысить напряжение [2]. СП могут подключатся последовательно для увеличения уровня выдаваемого напряжения или параллельно, что обеспечит высокий уровень постоянного тока. В случае большого количества СП применяют смешенное соединение. В качестве преобразователей всё чаще применяют двойной активный мост (ДАМ).

Целью статьи является разработка системы управления двойным активным мостом для повышения напряжения с СП для шин постоянного тока, от которых инверторы работают на сеть переменного тока. Для этих целей будет проанализированы способы управления преобразователем постоянного тока и на основе этого разработана система управления ДАМ.

Литературный обзор. Существуют различные методы управления преобразователем постоянного тока для микросетей, содержащих СП. Базовая конфигурация солнечной электростанции (СЭС) в режиме подключения к сети представлена на рисунке 1 и включает в себя следующие устройства: фотоэлектрические матрицы на основе СП, преобразователь постоянного тока, преобразователь переменного тока (инвертор), устройство отслеживания точки максимальной мощности (МРРТ) и управляющее оборудование вместе с фильтром нижних частот (ФНЧ). Устройство МРРТ обычно используется вместе с преобразователем мощности для оптимизации использования больших фотоэлектрических матриц. Реализация устройства МРРТ возможна различными способами: либо с преобразователем постоянного тока в постоянный, либо с инвертором, а иногда и с обоими.

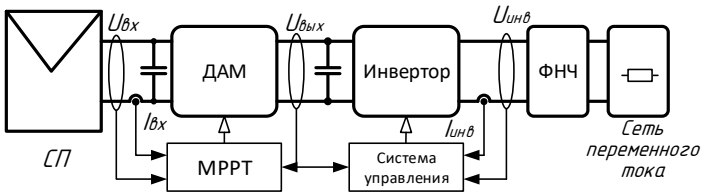


Рис. 1. Основные компоненты СЭС переменного тока

Чтобы полностью представить детали различных ранее и недавно разработанных методов МРРТ, была предпринята попытка и представлен критический анализ каждого метода.

Использование MPPT становится необходимым для обеспечения оптимальной работы СЭС, чтобы система работает с максимальной эффективностью [3]. Нелинейное поведение точки максимальной мощности (MPP) усложняет алгоритм отслеживания, поскольку интенсивность солнечного излучения и температура окружающей среды непрерывно изменяются в широком пределе в течении небольшой продолжительности времени. Целью внедрения MPPT является автоматическое определение выходного напряжения или выходного тока СЭС при определенной освещенности и температуре; это точка, в которой фотоэлектрическая матрица выдает максимальную выходную мощность. Реализация алгоритма MPPT и анализ этих изменений окружающей среды, а также P-U характеристики позволяют гарантировать, что СЭС работает на своем MPP (рис. 2).

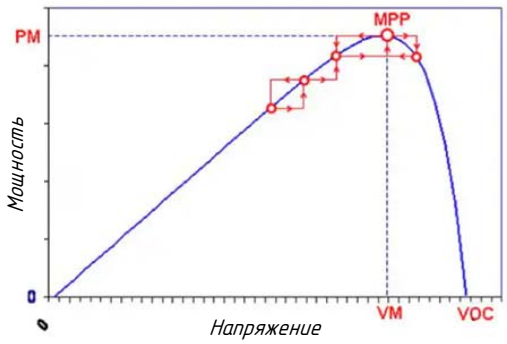


Рис. 2. P-U характеристика СП

В [4] авторы предлагают одноступенчатую трехфазную PVS для расширения возможностей MPPT; также установлено, что эта система способна удовлетворять спрос и вырабатывать электроэнергию в условиях частичного затенения. Метод MPPT предложен авторами в [5] на основе управления преобразователем переменного/постоянного тока, который подключен к выходу фотоэлектрической матрицы, поскольку он действует как непрерывная входная силовая нагрузка.

В последние несколько десятилетий многие исследователи работали над методами MPPT для солнечных фотоэлектрических систем. К настоящему времени исследователями были разработаны многочисленные методы, которые можно разделить на две основные категории:

- традиционные методы
- методы мягких вычислений.

Методы возмущения и наблюдения (P&O), восхождения на холм (HC), инкрементальной проводимости (IncCond), частичного разомкнутого замыкания (FOC), частичного короткого замыкания (FSC) и глобального MPPT относятся к общепринятым методам [6-9]. Переходя к методам мягких вычислений, системы, основанные на знаниях, представляют собой алгоритмы нечеткого логического управления (FLC) и искусственных нейронных сетей (ANN). Перед их внедрением важно предоставить подробные знания. Наиболее серьезным недостатком, связанным с алгоритмом, основанным на FLC, является то, что однажды определенные правила не могут быть изменены.

В СЭС метод Perturb and Observe (P&O) является одним из наиболее популярных и широко используемых методов среди всех доступных методов отслеживания MPP. При этом методе проводится периодическое полное сканирование всей вольт-амперной характеристики солнечной батареи (обычно раз в 2 часа), находит TMM, и до следующего полного сканирования контроллер «рыщет» от этой точки и вычисляет, как меняется мощность солнечной батареи, и сдвигает рабочую точку на новое напряжение, если при нем мощность больше. В результате этот алгоритм генерирует колебания вокруг глобального MPP, поскольку возмущения напряжения помогают ему непрерывно отслеживать глобальный MPP. Практически во всех контроллерах применяется именно этот метод. Недостатком метода считается постоянная необходимость проводить измерения, во время которых генерация энергии от модулей прерывается. Различные производители подбирают параметры поиска — глубину и частоту итераций, периодичность полного сканирования, — для того, чтобы наиболее оптимально отслеживать точку максимальной мощности солнечной батареи и получать максимальное количество энергии от Солнца. Что касается ограничений P&O, то они сильно страдают от создания высокой частоты возмущений вокруг глобального пика, а также от повышенных колебаний мощности [10].

В алгоритме инкрементальной проводимости IncCond наклон фотоэлектрических характеристик преобразуется на основе значения проводимости, полученного из отношения добавочной проводимости к мгновенной проводимости СП. В результате для преобразователя генерируется рабочий цикл. Чтобы минимизировать ошибку отслеживания в этом алгоритме, исследователи использовали несколько подходов, из которых улучшенный алгоритм представлен в [6] с переменным размером шага. Рабочий цикл генерируется в соответствии со следующим соотношением [11].

$$D(k) = D(k-1) \pm N \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)},$$

где k - номер итерации, P - мощность, D - обозначает рабочий цикл, U - напряжение, N - коэффициент масштабирования.

Среди всех доступных классических методов отслеживания MPP способ наискорейшего спуска является старейшим методом, который широко используется благодаря своей доказанной эффективности и простоте. Прежде всего, датчики получают значения напряжения и тока, а затем соответствующим образом настраивают рабочий цикл на основе рассчитанной мощности. Как только будет достигнуто определенное количество рабочих циклов, в зависимости от того, увеличивается или уменьшается рабочий цикл, преобразователь сможет реагировать на глобальном

MPP. Авторы в [12] представили точный алгоритм отслеживания, протестировав метод HC с чередующимся повышающим преобразователем в условиях равномерно изменяющегося облучения. Приведенные ниже соотношения приведены для расчета извлекаемой максимальной мощности от фотоэлектрического преобразователя:

$$P_g(\max) = \frac{P_1(\max)}{\eta}; \quad P_g(\max) = k_2 U_L^2,$$

где P_g(max) - генерируемая мощность, k_2 - управляющий коэффициент.

Основная часть. В микросетях, основанных на параллельном подключении СП, преобразователи постоянного тока, подключаемые к фотоэлектрическим панелям, должны регулироваться, чтобы гарантировать стабильную работу и отслеживать максимальную мощность (MPP) фотоэлектрической панели.

Работа с СП имеет три режима:

- автономный режим;
- сетевой режим;
- гибридный режим.

В автономном режиме СП подают электроэнергию непосредственно на подключенную нагрузку; в сетевом режиме СП подает электроэнергию в сеть электроснабжения. В гибридном режиме СП подает электроэнергию в электрическую сеть, а также к локально подключенной нагрузке посредством сетевого учета или льготного тарифа [7].

Электрическая схема системы управления ДАМ, основанной на преобразователе ДАМ, приведена на рис. 3. В такой системе СП подключена к входу низковольтной стороны преобразователя ДАМ, а выход высоковольтной стороны подключен к нагрузке, в качестве которой может выступать инвертор или шины постоянного тока с нагрузкой и аккумуляторами.

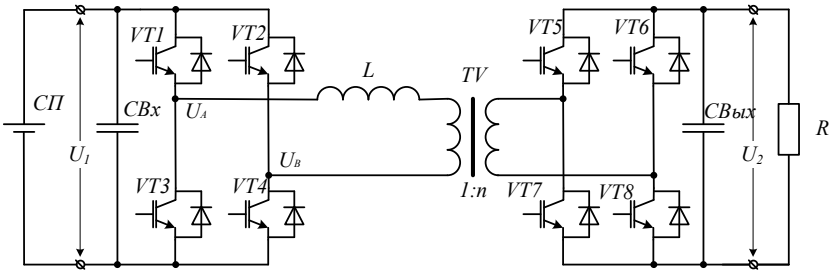


Рис. 3. ДАМ для повышения постоянного напряжения

Конденсатор C_{Bx} вставлен между СП и ДАМ для фильтрации пульсаций тока, генерируемых низковольтным мостом ДАМ-преобразователя. Аналогично, конденсатор $C_{Вых}$ необходим для фильтрации пульсаций тока, генерируемых высоковольтным мостом преобразователя ДАМ, что повышает качество постоянного тока и убирает пульсации. Транзисторы VT1-VT4 образуют инверторный мост (сторона низкого напряжения). Транзисторы VT5-VT8 образуют выпрямительный мост (сторона высокого напряжения). Для соединения обоих мостов используется высокочастотный трансформатор, и его модель учитывает индуктивность утечки L, относящуюся к первичной обмотке трансформатора.

ДАМ управляется с использованием метода фазного сдвига, который состоит из генерации двух цифровых сигналов переключения с фиксированным рабочим циклом (D = 50%) и фазовым сдвигом φ между сигналами управления, подаваемых на VT1 и VT5. Фазный угол меняется для регулирования напряжения на выходе выпрямительного моста. Коэффициент фазового сдвига может принимать значения от -180 до +180, но для передачи питания от фотоэлектрической панели к шине постоянного тока, т.е. для однонаправленной работы, значение φ должно быть ограничено от 0 до +180.

На рис. 4 приведены осциллограммы работы ДАМ, полученные путём имитационного моделированная в Matlab/SIMULINK.

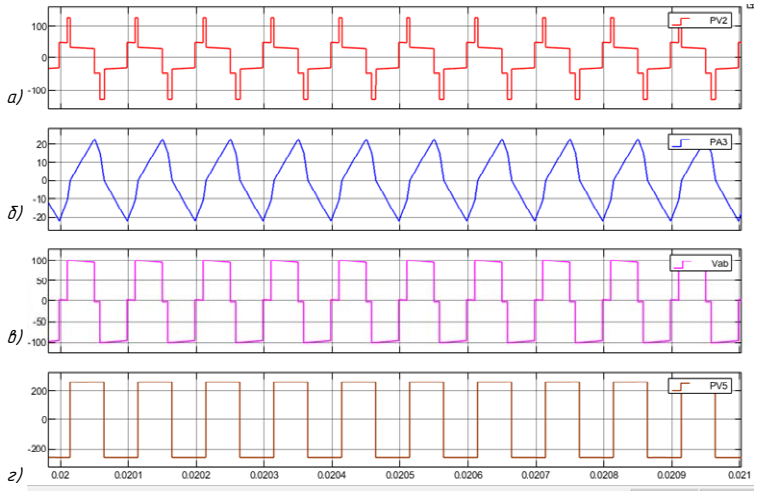


Рис. 4. Осциллограммы работы ДАМ: а) напряжение на дополнительной катушки индуктивности, ток на первичной обмотке трансформатора, в) напряжение с выхода инверторного моста; г) напряжение на выходе трансформатора

Как можно видеть из имитационного моделирования, максимальная мощность наблюдается при работе транзисторов VT1-VT4 в противофазе, что подтверждает исследования ДАМ. Эффективность работы ДАМ составил 89%, что не является максимальным для данного типа преобразователей и нуждается в доработке. Дальнейшие исследования будут направлены на повышения коэффициента полезного действия и стабильной работы при динамически изменяемой нагрузки.

Выводы. В статье представлен анализ систем управления двойным активным мостом с целью обеспечить максимальную мощность из солнечного панелей, реализовав алгоритм отслеживания. Каждая технология сама по себе накладывает ограничения и компромиссы в регулировании системы, независимо от размера электростанции и типа используемой техники. Поэтому перед внедрением следует учитывать соотношение между доходами и затратами на отслеживание. На основании анализа была реализована и проверена с помощью имитационного моделирования новая система управления.

Список литературы

1. Соболев В.С. Совершенствования зарядных устройств постоянного тока с использованием твердотельных трансформаторов // Образование, наука и молодежь - 2022. Керчь, 2022. С. 31-33.
2. Булатов Ю.Н. Крюков А.В., Суслов К.В. Изолированная система электроснабжения с энергетическими роутерами и возобновляемыми источниками энергии // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24. № 2. С. 124-134.
3. Ramos-Paja, C.A.; Saavedra-Montes, A.J. Adaptive Control of Photovoltaic Systems Based on Dual Active Bridge Converters. Computation 2022, vol. 10, p. 89.
4. Авдеев Б. А. Комплексные решения интеграции постоянного и переменного токов в адаптивных интеллектуальных распределительных сетях с помощью твердотельного трансформатора // Энергобезопасность и энергосбережение. 2022. № 3. С. 15–20.
5. IEA. World Energy Outlook 2021; Technical report; International Energy Agency: Paris, France, 2021.
6. Wang Y., Wang B., Chu C.C., Pota H., Gadh R. Energy management for a commercial building microgrid with stationary and mobile battery storage. Energy Build. 2016, vol. 116. P. 141–150.
7. Царева П.Е. Авдеев Б.А., Марковкина Н.Н., Епифанцев И.Р., Жиленков А.А. Моделирование работы трехфазного твердотельного трансформатора при изменении нагрузки // Электротехника. 2022 №6. С. 61-64. DOI: 10.53891/00135860_2022_6_61.
8. Соснина Е.Н. Шалухо А.В., Эрдили Н.И., Власов А.С. Мультиагентный подход к управлению разнородными источниками энергии в системах автономного электроснабжения // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения). Иваново, 2021. С. 252-254.
9. Ríos, S.J.; Pagano, D.J.; Lucas, K.E. Bidirectional Power Sharing for DC Microgrid Enabled by Dual Active Bridge DC-DC Converter. Energies 2021, vol. 14. P. 404.
10. Арсентьев Г.О. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение энергороутеров в системах электроснабжения с распределенной генерацией // Электроэнергетика глазами молодежи 2017. Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 143-146.
11. Вынгра А.В., Черный С.Г. Идентификация настройки пи-регулятора на платформе нейросетевой структуры // Датчики и системы. 2020. № 8 (250). С. 20-26.
12. Авдеев Б.А., Вынгра А.В. Совершенствование системы регулирования напряжения твердотельного трансформатора в интеллектуальных сетях электроснабжения // Изв. вузов. Электромеханика. 2022. Т. 65. № 3. С. 64-69.

Авдеев Борис Александрович, канд. техн. наук, доцент, dirigeant@mail.ru, Россия, Керчь, Керченский государственный морской технологический университет

CONTROL OF A DOUBLE ACTIVE BRIDGE IN A DC MICROGRID CONTAINING SOLAR PANELS

B.A. Avdeev

The question of the use of modern solar panels in DC and AC microcircuits is considered. The control systems of step-up and DC converters operating at the point of maximum power are analyzed. Based on the analysis, its own method of controlling a converter with galvanic isolation of the double active bridge type was developed. The model was investigated using simulation modeling. The oscillograms of operation are given and the ways of further improvement of the control system operating at the point of maximum power of solar panels are identified.

Key words: solar panel, double active bridge, control system, maximum power point.

Avdeev Boris Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, dirigeant@mail.ru, Russia, Kerch, Kerch state maritime technological university

УДК 621.354
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-376-377

АПРОБАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЗАРЯДНО-ДЕСУЛЬФАТИРУЮЩЕЙ СТАНЦИИ

М.Б. Маньков, Б.И. Марголис

В статье обоснована необходимость проведения исследований, подтверждающих эффективность технологических режимов разработанной зарядно-десульфатирующей станции. Предложена программа исследований и осуществлен выбор технических средств измерения контролируемых параметров свинцово-кислотного аккумулятора. Приведена блок-схема испытательного стенда. Продемонстрированы результаты экспериментальных исследований работы устройства в режиме десульфатации аккумуляторов асимметричным током. Представлены осциллограммы напряжения и тока в момент срабатывания порогового устройства, графики изменения ёмкости и внутреннего сопротивления аккумуляторов в процессе испытаний. Проанализированы результаты исследований и предложена перспектива дальнейших этапов экспериментальных исследований.

Ключевые слова: свинцово-кислотный аккумулятор, асимметричный ток, эффективность десульфатации, программа исследований, контролируемые параметры.

В связи с широким использованием свинцово-кислотных аккумуляторов, проблема продления срока их эксплуатации в настоящее время остается актуальной и опосредованно влияет на уменьшение загрязнения окружающей среды и снижение финансовых затрат на обслуживание и замену аккумуляторов. Эта задача может быть решена усовершенствованием методов заряда и созданием устройств для их реализации, поэтому создание надежной, недорогой и эффективной автоматической зарядно-десульфатирующей станции, осуществляющей заряд аккумуляторов асимметричным током, особенно актуально.

Разработана зарядно-десульфатирующая станция, формирующая импульсы асимметричного тока, содержащая мультивибратор на биполярных транзисторах и коммутатор на основе реле для соединения с зарядной и разрядной цепью [1,2].

В результате анализа электрохимических процессов, происходящих в свинцово-кислотных аккумуляторах, предложена стратегия их заряда и десульфатации. Для осуществления предложенной стратегии создан блок порогового устройства, определяющий выбор режимов работы и исключающий перезаряд аккумулятора [3].

В настоящее время в научных публикациях существует большой объем информации об использовании различных режимов заряда и их влиянии на характеристики аккумуляторов. Перспективность применения асимметричного тока по сравнению с постоянным током для восстановления ёмкости аккумуляторов подтверждена в отечественных и зарубежных исследованиях [4-11].

За последние полвека разработано и запатентовано значительное количество устройств с использованием асимметричного тока. Исследования демонстрируют влияние обратного импульса на улучшение газообмена в пористом электроде и распределение электрохимических процессов по его толщине.

Однако, сведения, содержащиеся в различных источниках, часто носят отрывочный и противоречивый характер. Обзор публикаций показал необходимость проведения экспериментальных исследований. Целью данной работы является проведение исследования, подтверждающего эффективность использования созданной зарядно-десульфатирующей станции в режиме десульфатации.

Материалы и методы. Важнейшей составной частью научных изысканий являются экспериментальные исследования, позволяющие подтвердить или опровергнуть выдвинутую гипотезу.

Аккумуляторы в процессе хранения и эксплуатации подвержены саморазряду и сульфатации, в результате чего происходит снижение ем-кости и увеличение внутреннего сопротивления. Возникает задача восстановления работоспособности свинцово-кислотных аккумуляторов при помощи электрической регенерации асимметричным током.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы два герметичных свинцово-кислотных аккумулятора AGM Delta DT 12045–12В–4,5А·ч и DTM 12090–12В–9А·ч, с различными сроками эксплуатации и различной потерей ёмкости. Согласно диагностическим измерениям фактическая ёмкость первого аккумулятора к началу проведения экспериментов составляла 38% от номинальной ёмкости, второго – 80%.

Рабочая гипотеза – применение зарядно-десульфатирующей станции в режиме десульфатации позволит улучшить эксплуатационные характеристики засульфатированных свинцово-кислотных аккумуляторов.

Для подтверждения гипотезы необходимо:

– разработать программу исследований;

– осуществить выбор технических средств измерения контролируемых параметров аккумулятора;

– собрать испытательный стенд;

– провести цикл экспериментальных исследований для апробации режима;

– оценить эффективность разработанного режима десульфатации аккумуляторов асимметричным током.

Испытания проводились по следующей программе:

1. Тестирование аккумуляторной батареи: определение напряжения разомкнутой цепи, внутреннего сопротивления и ёмкости.

2. Заряд аккумулятора асимметричным током в режиме десульфатации в течение 10 часов.

3. Выдерживание аккумулятора в течение 2 часов для релаксации.

Повторение пунктов 1-3. Процесс десульфатации аккумуляторной батареи может длиться до 30-50 часов, в зависимости от степени деградации.

4. Анализ изменения параметров аккумулятора с увеличением продолжительности десульфатации.

Заряд восстанавливает ёмкость аккумуляторной батареи и уменьшает внутреннее сопротивление, поэтому эти характеристики были выбраны в качестве основных контролируемых параметров при проведении эксперимента.

При решении задач оперативной диагностики аккумуляторов можно использовать специальные приборы, которые называются анализаторами или тестерами и позволяют определять параметры за 10-20 секунд. Значения

измеренных параметров дают возможность оценить степень деградации батареи. Для анализа переходных процессов тока и напряжения в аккумуляторе использовался осциллограф. Используемые при проведении испытаний средства измерений и их назначение представлены в таблице.

Используемые технические средства измерений

Наименование, тип и марка	Количество	Назначение
Осциллограф цифровой GDS–71102	1	Регистрация переходных процессов тока и напряжения
Электронный цифровой вольтметр V27T-DL	1	Измерение и контроль напряжения на АКБ
Измеритель внутреннего сопротивления АКБ YAOREA YR1035+	1	Измерение внутреннего сопротивления АКБ на переменном токе частотой 1кГц
Тестер ёмкости АКБ SKAT-BatTeSS	1	Измерение остаточной ёмкости и текущего напряжения АКБ

Для осуществления разработанной программы, с целью оценки эффективности исследуемого режима десульфатации аккумуляторов асимметричным током, был собран испытательный стенд, блок-схема которого представлена на рисунке 1.

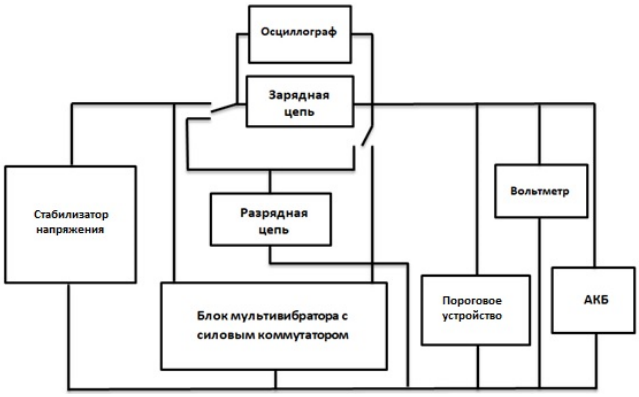
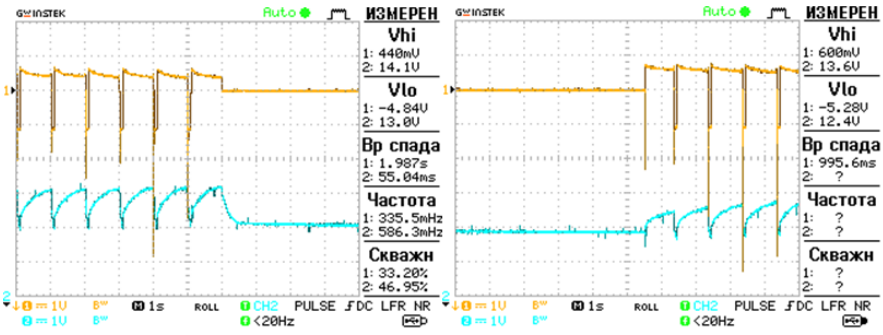


Рис. 1. Блок-схема испытательного стенда

Результаты и их обсуждение. Эксперимент повторялся согласно программе испытаний. Испытания проводились при нормальных условиях, температура воздуха 25°C.

Примеры осциллограмм заряда батареи DT 12045 при включении и выключения порогового устройства показаны на рисунке 2 а,б.



а ***б***

Рис. 2. Моменты срабатывания порогового устройства: а – включение; б – выключение

В процессе десульфатации через определенные промежутки времени осуществлялся контроль параметров аккумуляторов. На рисунке 3 а,б представлены графики изменения сопротивления и ёмкости аккумуляторов DT 12045 и DTM 12090 при проведении экспериментов.

Во всех экспериментах были зафиксированы качественные особенности поведения внутреннего сопротивления и ёмкости в процессе десульфатации аккумуляторов.

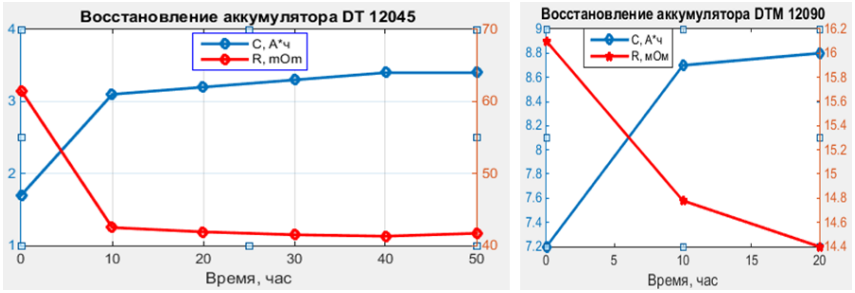
Эффективность режима десульфатации оценивалась по восстановленной ёмкости аккумуляторов и общей продолжительности его использования. Динамика восстановления ёмкости аккумуляторов в циклах десульфатации оценивалась в процентах по отношению к номинальной ёмкости, результаты её изменения в зависимости от количества проведенных циклов представлены на рисунке 4.

В результате эксперимента была выполнена программа по восстановлению ёмкости аккумулятора DTM 12090 – остаточная ёмкость батареи увеличилась с 80% до 98% за два цикла.

Эксперимент по регенерации аккумулятора DT 12045 с сильной потерей ёмкости выявил затруднения в восстановлении деградировавших батарей и позволил восстановить ёмкость с 38% остаточной ёмкости до 75%.

Заключение. Для целей подтверждения эффективности десульфатации свинцово-кислотных аккумуляторов с помощью асимметричного тока проведены эксперименты с фиксацией изменения величины внутреннего сопротивления и ёмкости десульфатируемых аккумуляторов DT 12045 и DTM 12090.

Увеличение ёмкости и снижение внутреннего сопротивление в процессе десульфатации подтвердили эффективность использования разработанной зарядно-десульфатирующей станции.



а *б*

Рис 3. Графики изменения сопротивления и ёмкости аккумуляторов а – АБ DT 12045; б – DTM 12090

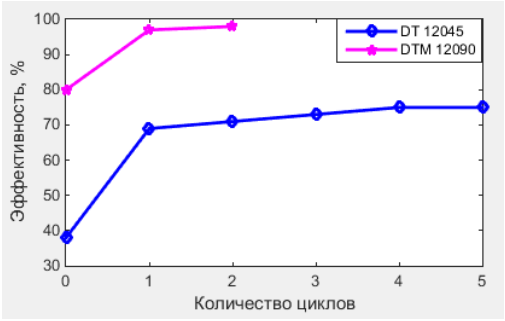


Рис. 4. Результаты испытаний исследуемых аккумуляторов по определению эффективности десульфатации

По представленным результатам можно сделать вывод, что процесс десульфатации является наиболее эффективным в первом цикле, затем происходит незначительный прирост ёмкости и стабилизация параметров.

Полное восстановление сильно деградировавших аккумуляторов не представляется возможным, поэтому следует использовать асимметричный ток для профилактики, не допуская сильной сульфатации.

Следует провести дополнительные исследования длительного использования асимметричного тока.

Список литературы

1. Патент 2721006 РФ. МПК H02J 7/10. Устройство для заряда и десульфатации аккумуляторов / М.Б. Маньков, К.В. Сидоров. Опубл. 15.05.2020. Бюл. № 14.

2. Маньков М.Б. Разработка автоматического зарядно-десульфатирующего устройства // Сборник трудов XXXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2019». Рязань: Изд-во ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2019. С. 120–123.

3. Маньков М.Б., Марголис Б.И. Разработка и моделирование порогового устройства для контроля напряжения аккумулятора при работе зарядно-десульфатирующей станции // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2023. Вып. 4. С. 537–541.

4. Каменев Ю. Б., Чунц Н. И. Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора. 4. Импульсный заряд асимметричным током, газовыделение и ресурс // Электрохимическая энергетика. 2020. Т. 20, № 3. С. 146–156.

5. Колосовский, В.В. Метод десульфатации пластин аккумуляторов при заряде асимметричным током / В.В. Колосовский // Известия СПб ГАУ. 2017. №48. С. 199–204.

6 Людин В.Б. Ускоренный заряд свинцово-кислотных аккумуляторов сельскохозяйственной техники реверсивным током: автореф. … дис. канд. техн. наук: 05.20.02 / Людин Валентин Борисович. М., 1994. 22 с.

7. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока. М.: Советское радио, 1978.

8. Сергиенко Н.Е. Влияние способов заряда свинцово-кислотных аккумуляторных батарей на их состояние / Н.Е. Сергиенко, А.Н. Сергиенко, Н.Е. Оверко // Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 22. С. 30–35.

9. Струков А.Н. Разработка и обоснование параметров вентильно-конденсаторного преобразователя для регенерации стартерных аккумуляторов сельскохозяйственной техники: автореф. … дис. канд. техн. наук: 05.20.02 / Струков Алексей Николаевич. Москва, 2012. 21 с.

10. Тюхтин К.И. Разработка электротехнологии и преобразователя электроэнергии для регенеративного заряда аккумуляторов мобильной сельскохозяйственной техники: автореф. … дис. канд. техн. наук: 05.20.02 / Тюхтин Константин Иванович. Москва, 2011. 23 с.

11. Nasser Kutkut, Ph.D. Power Designers, LLC - Madison, WI. Negative Pulse Charging: Myths and Facts. [Электронный ресурс] URL: http://www.batterypoweronline.com/images/PDFs_articles_whitepaper_appros/powerdesigners.pdf (дата обращения:: 17.10.2023).

Маньков Матвей Борисович, аспирант, dr.mankoff@yandex.ru, 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

APPROBATION OF THE TECHNOLOGICAL MODE OF THE CHARGING-DESULFATE STATION

M.B. Mankov, B.I. Margolis

The article substantiates the need to conduct research confirming the effectiveness of the technological modes of the developed charging-desulfate station. A research program was proposed and a selection of technical means for measuring the controlled parameters of a lead-acid battery was carried out. A block diagram of the test bench is shown. The results of experimental studies of the operation of the device in the mode of desulfation of batteries with asymmetric current are demonstrated. Oscillograms of voltage and current at the moment the threshold device is triggered, graphs of changes in capacity and internal resistance of batteries during testing are presented. The research results are analyzed and the prospect of further stages of experimental research is proposed.

Key words: lead-acid battery, asymmetrical current, desulfation efficiency, research program, controlled parameters.

Mankov Matvey Borisovich, postgraduate, dr.mankoff@yandex.ru, 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

УДК 621.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-379-380

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ЗАЩИТ НА ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

О.В. Табаков, Т.В. Харитонова

В работе рассмотрен основные преимущества цифровой релейной защиты, выполнен реальный расчет затрат на реализацию такой защиты в условиях реальной тягой подстанции.

Ключевые слова: цифровая релейная защита, микропроцессоры, тяговая подстанция, затраты.

Релейная защита начала свое существование с развитием мировой энергетики, когда первые аварии приводили к полному выходу из эксплуатации электроустановок в силу отсутствия защиты. В настоящий момент без релейной защиты не обходится ни одна электроустановка, она способна отделить аварийный участок. В начале 2000-х начался период повсеместной цифровизации, которая коснулась и устройств релейной защиты. Скептические настроения ведущих специалистов тормозили внедрение микропроцессоров, однако на сегодняшний день все мировое энергетическое сообщество признало право на существование цифровой релейной защиты.

В условиях кризиса, вызванного пандемией короновируса, замедлилась модернизация устройств электроснабжения. Предписаниями было установлено продление срока службы существующих устройств за счет периодических плановых ремонтов и регулярной диагностики. Однако, это не решает проблему, техническое состояние постепенно ухудшается, что может привести к отказу релейной защиты и повреждению дорогостоящего оборудования подстанций.

Поэтому необходимы более радикальные шаги, в том числе замена устройств РЗА на более современные.

К недостаткам электромеханической и электронной релейной защиты можно отнести:

1) большие габариты оборудования;
2) низкая скорость срабатывания реле;
3) за счёт большого количества проводов от ТТ и ТН до РЗА, уменьшается удобство обслуживания.

С внедрением цифровых систем можно в несколько раз повысить быстродействие защиты. Что в свою очередь влияет на ресурс коммутационных аппаратов. У микропроцессорных защит отсутствуют контакты, от которых в реле зависит его ресурс. Терминалы имеют высокую чувствительность и селективность, что является важным при модернизации подстанций.

В системе энергетики в качестве контролируемого параметра выступает величина тока или величина напряжения в электрической сети. Механическая релейная защита настраивается таким образом, что она просто реагирует на отклонение измеряемого параметра. Такие устройства были внедрены повсеместно на предприятиях и в жилых объектах недвижимости. Данные устройства имеют простое устройство, что дает им высокую надежность. Однако необходимо развиваться в ногу со временем и на смену пришли микропроцессорные устройства. Такие устройства не просто сравнивают ток и напряжение в сети, они способны создавать целый протокол или журнал наблюдений, в котором отражается причина отказа, дата и время отказа. Возможна даже визуализация процесса в виде векторной диаграммы. Но главная функция сохранилась прежней – быстрое отключение электрической цепи.

Применение ЦРЗ имеет множество преимуществ, основные из них заключаются в:

1) увеличение удобства обслуживания;
2) повышение надёжности системы;
3) уменьшение габаритов устройств, за счёт уменьшения количества используемых блоков;

4) регистрации процессов в энергосистеме;
5) оптимизации системы управления сетями;
6) возможности анализа повреждений, возникших внутри энергосети;
7) возможности сокращения обслуживающего персонала.

Структурная схема ЦЗ разного назначения схожи и имеют общие черты (рис. 1). Основным элементом цифрового устройства (ЦУ) является микропроцессор, который передаёт информацию с периферийных элементов. Периферийные устройства связывают микропроцессор с объектом управления, измерительными устройствами, обслуживающим персоналом и т.д.

Обязательными элементами любого ЦУ РЗА являются: входные (U_1…U_4) и выходные (KL_1…KL_j) преобразователи сигналов, аналого-цифровой преобразователь(U_6, U_7), блок управления и ввода информации(SB_1, SB_2), дисплей(H), блок питания(U_5) и порт для соединения с другими цифровыми устройствами.

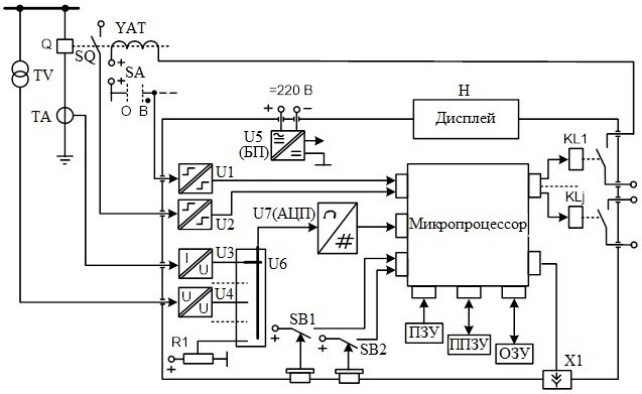


Рис. 1. Структурная схема ЦЗ

Гальваническую развязку обеспечивают входные преобразователи, приводят контролируемые сигналы к единому виду и нормированному уровню. Сигналы проходят через частотную фильтрацию перед аналого-цифровым преобразованием.

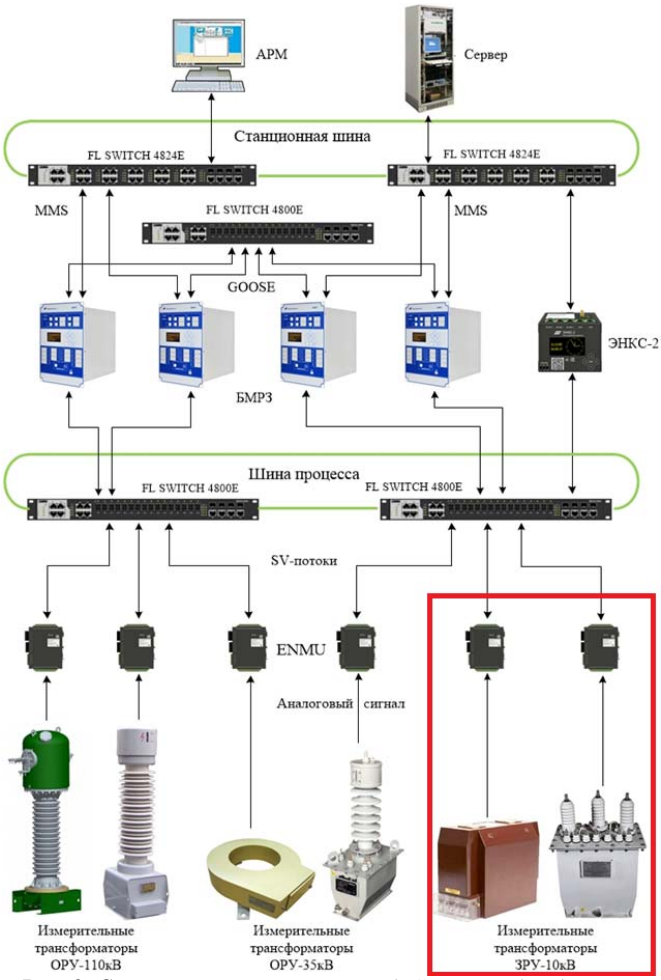


Рис. 2. Структурная схема взаимодействия оборудования

Выходные преобразователи также обеспечивают гальваническую развязку коммутируемых цепей и должны обладать соответствующей коммутационной способностью.

Путь аналого-цифрового преобразования включает в себя мультиплексор (U_6) и АЦП (U_7). Мультиплексор работает как коммутатор, поочередно опрашивающий входные преобразователи и передает сигнал в АЦП. Это позволяет использовать один АЦП, но уменьшает быстродействие защиты. Для увеличения быстродействия применяют отдельные АЦП.

БП обеспечивает стабильное питание устройства, не зависимо от возможных просадок напряжения в питающей сети.

Дисплей и кнопки управления позволяют персоналу получать и вводить информацию, также изменять режимы работы устройства.

Коммуникационный порт служит для связи с внешними цифровыми устройствами, подключения устройства к АСУ ТП и т.д., данный порт необходим для удаленной работы с цифровым терминалом.

Устройства релейной защиты объединяются в общую шину процесса станционной шиной. Такая централизация позволяет собирать всю информацию и передавать ее выше. Также терминалы способны обмениваться информацией между собой на уровне присоединения. Применение информационных шин значительно уменьшает количество медных проводов, упрощает настройку и эксплуатацию системы, что сказывается на надежности системы в целом. Также при использовании оптоволоконных кабелей в десять раз увеличивается скорость передачи данных по сравнению с медью. Помимо высокой скорости передачи сигнала, уход от медных проводов позволяет сократить случаи вандализма и удешевить эксплуатационные расходы.

Данные от терминалов РЗА по станционной шине передаются на верхний уровень, где персонал в соответствии со своим уровнем доступа может получить оперативные данные с любого терминала.

Для создания цифровой релейной защиты и автоматики в РУ-10/35кВ на трансформаторных подстанциях необходимо:

– Устройство ENMU (10шт);
– Интеллектуальные терминалы:

Защита, автоматика и управление вводных выключателей ВВ – 10/6кВ – терминал БМРЗ-ТПВВ-01 (2шт). Защита отходящих линий районных потребителей – терминал БМРЗ-ТПКЛ-01 (6 шт). Защита отходящих линий продольного электроснабжения (ПЭ) – терминал БМРЗ-АБПЭ-01 (6 шт).

Внедряемое оборудование (согласно схеме типовой трансформаторной подстанции)

Оборудование	Количество, шт
Устройство сопряжения с шиной ENMU	10
Цифровые терминалы защиты: БМРЗ-ТПВВ-01 БМРЗ-ТПКЛ-01 БМРЗ-АБПЭ-01	 2 6 6
Устройство синхронизации времени ЭНКС-2	1
Шина процесса – коммутаторы FL SWITCH 4800E	1
Станционная шина – коммутаторы FL SWITCH 4824E	1

Капитальные вложения и затраты на пуско-наладочные работы составят порядка 3.8 млн.руб. (с учётом НДС 20%).

Работы производят бригада из двух человек электромеханик и электромонтер.

Применение действующей системы релейной защиты приводит к ложным срабатываниям от 6 до 26 раз в год на одну отходящую линию. На определение причин срабатывания и восстановление системы в работу требуется до двух часов, что приводит к недополученной прибили за переработанную электроэнергию.

Экономический эффект достигается разницей в потребности средств на обслуживание этой защиты, а также высокой надежности срабатывания по сравнению со старой. На обслуживание микропроцессорной защиты требуется меньше рабочей силы (меньший штат сотрудников).

Основным преимуществом микропроцессорных защит является более высокая надежность срабатывания, а также меньше вероятности ложных срабатываний, существенно меньше текущие затраты, нет перерывов в электроснабжении оборудования. Ориентировочная экономия применения цифровой защиты составит 2566,364 тыс. рублей (с учетом НДС 20%) в год. При этом срок окупаемости составит 1,5 года.

Таким образом, если заменить релейную защиту на всей трансформаторной подстанции, возможности системы электроснабжения данного участка увеличатся. Станет доступно управление защитой и передачи от неё информации на географически удалённые уровни управления. При принятии стандарта МЭК61850 будет доступна функциональная совместимость оборудования разных производителей. С учётом выше сказанного мы получим полностью цифровую систему от уровня процесса подстанции до центра управления сетью.

Список литературы

1. Бошкарева Т.В. Адекватность результатов моделирования процессов в упругих элементах / Т. В. Бошкарева, Е. В. Добрынин, О. В. Табаков // Вестник транспорта Поволжья. 2019. № 4(76). С. 7-13.

2. Учет распределения тока в тяговой сети при проектировании и усилении контактной подвески / Е. В. Добрынин, О. В. Табаков, И. П. Гордеев, Е. М. Плохов // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 2(80). С. 16-21.

3. Система визуального контроля коммутационных аппаратов / Е. В. Добрынин, Т. В. Бошкарева, С. А. Митрофанов [и др.] // Электротехника. 2017. № 3. С. 50-54.

4. Добрынин Е. В. Система контроля напряжения в контактной сети / Е. В. Добрынин, Т. В. Бошкарева, О. В. Табаков // Электротехника. 2020. № 3. С. 46-49.
5. Измерительные трансформаторы СЭЩ [Электронный ресурс] URL: https://www.electroshield.ru/catalog/transformatory-izmeritelnie (дата обращения: 10.05.2023).
6. Устройство сопряжения с шиной процесса ENMU. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] ГКД: https://enip2.ru/documentation/re_enmu.422100.001.pdf (дата обращения: 10.05.2023).

Табаков Олег Валентинович, канд. техн. наук, доцент, tabakov@samgups.ru, Россия, Самара, Самарский государственный университет путей сообщения,

Харитонова Татьяна Владимировна, канд. техн. наук, доцент, boshkareva@samgups.ru, Россия, Самара, Самарский государственный университет путей сообщения

THE RELEVANCE OF THE APPLICATION OF DIGITAL PROTECTIONS AT TRANSFORMER SUBSTATIONS

O.V. Tabakov, T.V. Kharitonova

The paper considers the main advantages of digital relay protection, and makes a real calculation of the costs of implementing such protection in a real traction substation.
Key words: digital relay protection, microprocessors, traction substation, costs.

Tabakov Oleg Valentinovich, candidate of technical sciences, docent, tabakov@samgups.ru, Russia, Samara, Samara State University of Railway Engineering,

Kharitonova Tatyana Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, boshkareva@samgups.ru, Russia, Samara, Samara State University of Railway Engineering

УДК 621.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-382-383

ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЯХ

О.В. Табаков, Т.В. Харитонова

Внедрение в систему бесконтактной диагностики видеокамер и тепловизионных камер позволит получать достоверную информацию в режиме реального времени. Использование беспроводных систем значительно упрощает процесс. В статье приводятся результаты опытов по установке видеокамер совместно с датчиками и тепловизионными камерами в целях диагностики состояния разъединителей.
Ключевые слова: диагностика, видеокамера, датчики, тепловизор, визуальный контроль.

Электрические подстанции являются важным звеном в энергетической системе, обеспечивая перенос электроэнергии от генерирующих объектов к потребителям. Для эффективной работы подстанции, необходимо правильно установить и контролировать положение коммутационных аппаратов, таких как выключатели, разъединители и контакторы.

Коммутационные аппараты являются основными элементами подстанции, предназначенными для управления электрическими цепями. Они переключают и разъединяют электрические цепи при необходимости, такой как ремонт оборудования или настройка схемы подключения. Неправильное положение коммутационных аппаратов может привести к авариям на подстанции, повреждению оборудования и даже прерыванию электроснабжения.

Один из способов контроля положения коммутационных аппаратов - это визуальный контроль. Этот метод заключается в проверке положения коммутационных аппаратов визуально с помощью специальных инструментов, таких как зеркала и телескопы. Визуальный контроль является неотъемлемой частью регулярного технического обслуживания подстанции.

Визуальный контроль позволяет операторам подстанции проверить положение коммутационных аппаратов на всех уровнях, включая верхние и нижние ярусы. Он также позволяет операторам обнаружить любые неисправности в работе коммутационных аппаратов, такие как коррозия, износ или повреждения. Визуальный контроль позволяет операторам принимать необходимые меры по устранению этих проблем до того, как они приведут к серьезным авариям.

Одним из важных аспектов визуального контроля является обучение операторов правильному проведению этой процедуры. Операторы должны быть обучены использованию специальных инструментов и методик, которые обеспечивают правильную оценку положения коммутационных аппаратов. Это позволяет операторам быстро и эффективно обнаруживать любые неисправности и сразу же предпринимать необходимые меры.

Визуальный контроль также имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами контроля положения коммутационных аппаратов. Например, он не требует выключения электрооборудования для проведения проверки, что позволяет сократить время простоя и увеличить эффективность работы подстанции. Он также может быть проведен быстро и легко, что делает его доступным для регулярного использования.

Однако, как и любой другой метод контроля, визуальный контроль имеет свои ограничения. Он может быть затруднен в случаях, когда коммутационные аппараты находятся в труднодоступных местах или плохо освещенных зонах. Кроме того, визуальный контроль не всегда может обнаружить скрытые дефекты, такие как трещины и повреждения внутренних деталей коммутационных аппаратов.

Развитие микропроцессорных технологий перевело системы автоматического управления на новый уровень, где обработка большого объема информации производится практически мгновенно, по сравнению с переходными процессами, происходящими в электрической сети. Это позволяет отслеживать не только состояние объекта управления (включено/выключено), но и его параметры, а также параметры электрического тока, протекающего через него. На базе микропроцессоров создаются уже не просто автоматические системы управления, а интеллектуальные, при этом частичная переработка информации и принятие управленческих решений происходит на самом объекте управления – цифровые защиты, реклоузеры, станции управления выключателями.

Но, несмотря на развитие информационных технологий, основную функцию управления все же несет человек – энергодиспетчер (или дежурный персонал): сборка и разборка схем для проведения ремонтно-ревизионных работ; отключение и подключение потребителя либо источника, питающего сеть и т.д. [2]. В задачи автоматики входит обработка аварийных ситуаций и поддержание заданного режима работы, а в задачи энергодиспетчера – выбор режимов и параметров работы сети и принятие основных стратегических решений.

Как уже было сказано выше, для принятия управленческого решения необходимо иметь достоверную и полную информацию о состоянии объекта управления и параметрах окружающей его среды. В частности, рассмотрено управление разъединителями.

Разъединители применяются в энергетике повсеместно и служат для создания видимого разрыва. В системе тягового электроснабжения они устанавливаются как на опорах контактной сети, так и во всех распределительных устройствах тяговых подстанций. Разъединители отличаются конструктивно и разрывают цепи высокого напряжении. Без разъединителя невозможно безопасное выполнение работ. Таким образом, от состояния разъединителя напрямую зависит безопасность обслуживающего персонала и сохранность оборудования.

Во включенном состоянии разъединитель создает электрическое соединение токопроводящей цепи и обеспечивает надежность электроснабжения.

Ключевое слово в функции разъединителя – «видимый» разрыв. При дистанционном управлении разъединителями энергодиспечер может ориентироваться только на показания системы телесигнализации. Однако эта информация не всегда оказывается достоверной. Причиной может служить как состояние аппаратуры телесигнализации, так и состояние самого разъединителя.

При эксплуатации разъединителя возможны его поломки, которые связаны с неправильной регулировкой ножей или привода, износом механических частей, температурными перепадами, образованием наледи и т.д.

Как показывает опыт, при отключении разъединителя может произойти заклинивание ножей и разрушение изоляторов – привод отрабатывает переключение и сигнальный датчик сообщает об этом энергодиспетчеру, но цепь остается замкнутой. В другом случае – при включении, из-за разрегулировки ножей, цепь либо не замкнется, либо контакт будет иметь большое сопротивление, что приведет к его пережогу при большой токовой нагрузке.

Установка дополнительных датчиков, контролирующих состояние цепи (замкнута/разомкнута) помогает контролировать процесс переключения, но не состояние самого оборудования. То есть позволяет определить аварийную ситуацию, но не предотвратить.

Передача информации в виде изображения позволяет увеличить ее объем, достоверность и скорость. Таким образом, энергодиспетчер по видимому изображению разъединителя сможет определить не только его положение, но и состояние – наличие механических повреждений до, вовремя и после переключения. Система видеоконтроля позволит исключить вероятность ложного отключения, когда ножи залипли в ламелях или обледенели.

В настоящий момент существует огромное множество различных систем видеонаблюдения и видеоконтроля. Разнообразие невообразимо широко – это и «видео няня», и система распознавания лиц, камеры контроля нарушения дорожного движения. В зависимости от своего назначения камеры могут работать в любое время суток при любой освещенности в различных диапазонах частот электромагнитного излучения – от инфракрасной области, до ультрафиолетовой. Любая система видеоконтроля имеет четыре основных составляющих: (рис.1):

– камера;

– оборудование, необходимое для передачи данных;

– сервер обработки полученной информации;

– программное обеспечение.

Выбор оборудования зависит от задач, которые стоят перед системой. В частности, для контроля разъединителя предлагается отслеживать его положение, внешнее состояние и качество контакта при замыкании ножей.

На примере разъединителей можно сказать, что только для контроля положения и внешнего состояния достаточно использования видеокамеры с разрешением, зависящим от расстояния до объектов и их числа, контролируемых одной камерой. Но поскольку разъединители устанавливаются на удаленных участках, а их отключение выполняется в любое время суток при любых погодных условиях, недостаточно установки только лишь одной камеры, следует использовать инфракрасную камеру.

Что касается контроля качества контакта в замкнутых ножах, то здесь следовало бы использовать тепловизор. При неправильной регулировке, ножи могут не создать надежный контакт, то есть удельное сопротивление его окажется большим, что приведет к потерям электроэнергии и нагреву контакта (рис.2). Повышенный нагрев контакта может привести при увеличении нагрузки к пережогу, а значит к сбою в питании. Тепловизор как раз и позволит проконтролировать температуру нагрева контакта и в автоматическом режиме и ручном [3, 4].

Тепловизор является также инфракрасной видеокамерой, но только работающей в другом частотном диапазоне (5-20 мкм) и обладающей большей чувствительностью. То есть, инфракрасная камера работает на отраженном от объекта свете (0,9 мкм), поэтому в ночное время и требуется подсветка, а тепловизор фиксирует собственное излучение объекта. Стоимость тепловизора в 10-100 раз превышает стоимость инфракрасной камеры и своей ценой может перекрыть стоимость снижения рисков аварийных ситуаций. Однако и инфракрасную камеру также можно применять для контроля нагрева. Для этого следует использовать контрольные точки, на сравнении интенсивности

излучения с которыми, система обработки изображения сможет распознать нагрев, возможно также использование термокраски. В случае ошибочного отключения под нагрузкой возникнет дуга, которая даст излучение уже в видимом для камеры диапазоне и также легко может быть распознано.

Процесс передачи данных осуществляется по проводному и беспроводному соединению. Беспроводная связь обеспечивается радиоканалами, настроенными на определенный диапазон частот. В качестве проводной связи может служить практически любой вид кабеля. Как правило, это коаксиальный, оптоволоконный или витая пара, подключаемая и обеспечивающие связь с локальной или глобальной сетью.

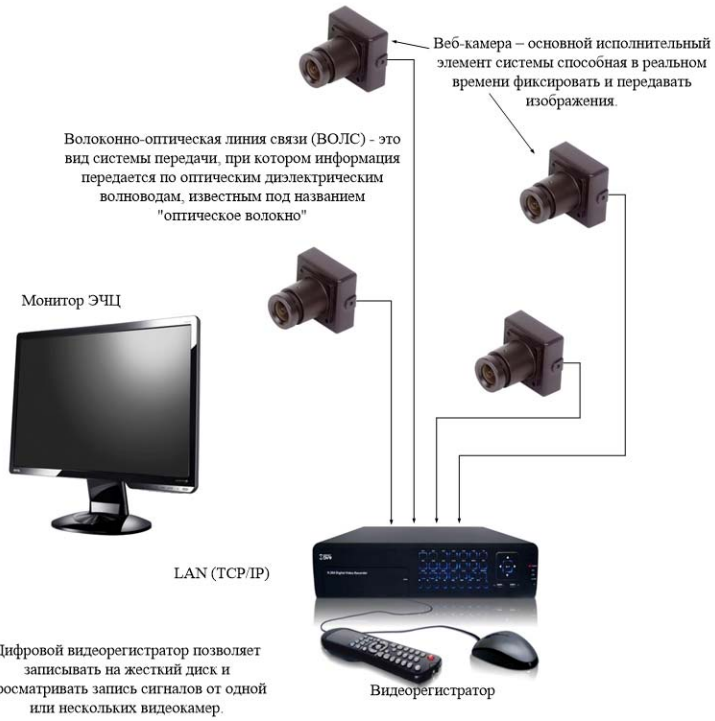


Рис. 1. Система визуального контроля

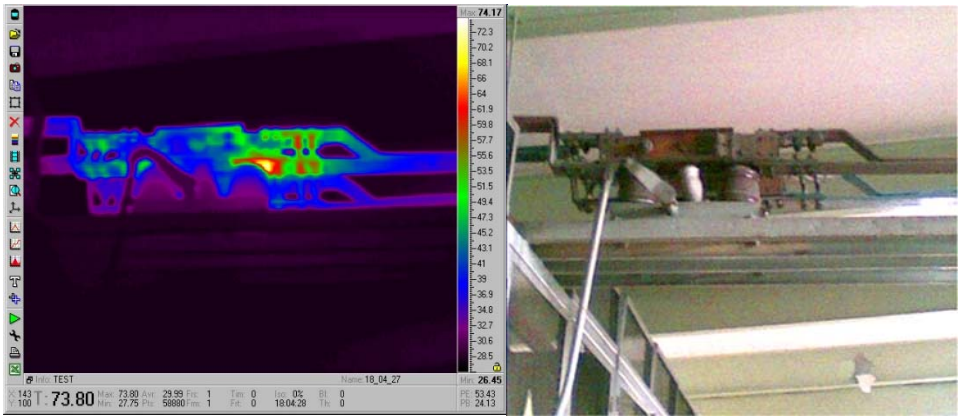


Рис. 3. Контроль нагрева контакта

Проводная связь имеет массу недостатков, но у нее есть неоспоримый плюс – высокий уровень защиты от помех и отсутствие излучения. Также очень высока скорость передачи данных – она составляет до 3Гбит/с. Но проводная связь далеко не всегда возможна на объектах тяговой энергетики, когда нет возможности размещать дополнительный кабель на опорах контактной сети. Также существует большая вероятность обрыва кабеля в зимнее время года из-за гололедных отложений.

Беспроводное видеонаблюдение возможно там, где проложить кабель практически невозможно, или затрачиваемые материальные средства на прокладку настолько высоки, что перебивают необходимость какой либо системы наблюдения.

На сегодняшний день Wi-Fi, ZigBee, GSM - самые распространенные и востребованные технологии передачи данных для организации беспроводных сетей.

В стандартах Wi-Fi и Zigbee – обеспечивает невысокое потребление энергии и передача данных на частоте со скоростями до 100 Мб/с, но на небольшое расстояние, причем в условиях прямой видимости.

GSM – наиболее распространенный на сегодняшний день стандарт беспроводной цифровой сотовой мобильной связи. Стандарт, относящийся к поколению 4G, обеспечивает разделение каналов по времени и частоте. Дальность действия 120 км. Максимальная скорость передачи до 100 Мбит/с.

С точки зрения питания видеоустройств на отдаленных участках существует риск возникновения перебоев электроснабжения или отсутствие связи по беспроводным каналам. И тут очень важно наличие в современных камерах собственной памяти. Перерыв в питании приведет к сбою и энергодиспетчер увидит это, но после восстановления питания не будет так называемых «мертвых зон» и оперативная обстановка будет видна диспетчеру.

Получаемая с контролируемого объекта информация обрабатывается и хранится на сервере АРМ энергодиспетчера. Для хранения используются современные цифровые технологии big data. Однако предлагается хранить информацию определенное время (сутки), сохранять только моменты оперативных переключений или аварийных ситуаций.

Программное обеспечение для системы визуального контроля – это отдельная тема, поскольку на него возлагается обработка изображения контролируемого объекта и формирование сообщения энергодиспетчеру. То есть обработка изображения позволит на программном уровне проконтролировать положение разъединителя и отдельные показатели его состояния. И, в случае отклонения, сообщить об этом энергодиспетчеру. Энергодиспетчер в нормальном режиме будет видеть только короткий момент перевода разъединителя из одного положения в другое после формирования приказа и его исполнения. Либо может отслеживать состояние объекта по запросу. Такой подход обеспечит необходимую функцию контроля и в тоже время не создаст загромождение рабочего пространства энергодиспетчера.

В целом, визуальный контроль положения коммутационных аппаратов на электрических подстанциях является важной частью технического обслуживания и контроля качества работы энергосистемы. Этот метод контроля помогает операторам подстанций быстро обнаруживать любые неисправности и принимать меры для их устранения, что помогает сохранять стабильность и надежность работы электрических подстанций. Однако важно помнить, что визуальный контроль не является универсальным методом контроля и его использование должно быть дополнено другими методами контроля, такими как термографический контроль и контроль вибрации, для обеспечения максимальной эффективности контроля и обнаружения любых возможных проблем.

Список литературы

1. Бошкарева Т.В. Адекватность результатов моделирования процессов в упругих элементах / Т. В. Бошкарева, Е. В. Добрынин, О. В. Табаков // Вестник транспорта Поволжья. 2019. № 4(76). С. 7-13.
2. Учет распределения тока в тяговой сети при проектировании и усилении контактной подвески / Е. В. Добрынин, О. В. Табаков, И. П. Гордеев, Е. М. Плохов // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 2(80). С. 16-21.
3. Табаков О.В. Система визуального контроля разъединителей на трансформаторных подстанциях / О. В. Табаков, Т. В. Харитонова, А. М. Батищев // Наука и образование транспорту. 2021. № 2. С. 82-83.
4. Бошкарева Т.В. Адекватность результатов моделирования процессов в упругих элементах / Т. В. Бошкарева, Е. В. Добрынин, О. В. Табаков // Вестник транспорта Поволжья. 2019. № 4(76). С. 7-13.
5. Система визуального контроля коммутационных аппаратов / Е. В. Добрынин, Т. В. Бошкарева, С. А. Митрофанов [и др.] // Электротехника. 2017. № 3. С. 50-54.
6. Добрынин Е.В. Система контроля напряжения в контактной сети / Е. В. Добрынин, Т. В. Бошкарева, О. В. Табаков // Электротехника. 2020. № 3. С. 46-49.
7. Добрынин Е.В. Цифровая подстанция. Метод реализации / Е. В. Добрынин, И. А. Ефремова // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 1(79). С. 16-22. EDN DMDDMZ.
8. Козменков О.Н., Ефремова И.А. Комплексный подход к диагностике трансформаторов // Наука и образование транспорту. 2018. № 1. С. 245–249.
9. Козменков О.Н., Ефремова И.А. Управление объектами системы тягового электроснабжения в концепции цифровой железной дороги // Наука и образование транспорту. 2018. № 1. С. 237–240.

Табаков Олег Валентинович, канд. техн. наук, доцент, tabakov@samgups.ru, Россия, Самара, Самарский государственный университет путей сообщения,

Харитонова Татьяна Владимировна, канд. техн. наук, доцент, boshkareva@samgups.ru, Россия, Самара, Самарский государственный университет путей сообщения

VISUAL CONTROL OF SWITCHING DEVICES AT ELECTRICAL SUBSTATIONS

O.V. Tabakov, T.V. Kharitonova

The introduction of contactless diagnostics of video cameras and thermal imaging cameras into the system will allow obtaining reliable information in real time. Using wireless systems greatly simplifies the process. The article presents the results of experiments on installing video cameras together with sensors and thermal imaging cameras in order to diagnose the condition of disconnectors.

Key words: diagnostics, video camera, sensors, thermal imager, visual control.

Tabakov Oleg Valentinovich, candidate of technical sciences, docent, tabakov@samgups.ru, Russia, Samara, Samara State University of Railway Engineering,

Kharitonova Tatyana Vladimirovna, candidate of technical sciences, docent, boshkareva@samgups.ru, Russia, Samara, Samara State University of Railway Engineering

УДК 621.352.6
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-386-387

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ НА ОСНОВЕ НЕСКОЛЬКИХ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.В. Шалухо, И.А. Липужин, Ю.Н. Шувалова

Статья посвящена разработке алгоритмов управления энергоустановками с двумя водородными топливными элементов с одинаковыми характеристиками. Выполнено математическое моделирование работы энергоустановки и определена оптимальная загрузка топливных элементов на всем диапазоне мощностей нагрузки. Разработаны два алгоритма управления: минимизации расхода водорода и продление срока эксплуатации энергоустановки. Разработана Simulink модель энергоустановки и ее системы управления. Выполнено сравнение расхода водорода энергоустановкой при использовании разработанных алгоритмов. Определены дальнейшие направления совершенствования алгоритмов управления.

Ключевые слова: водородный топливный элемент, мультистек, имитационная модель, математическая модель, система управления

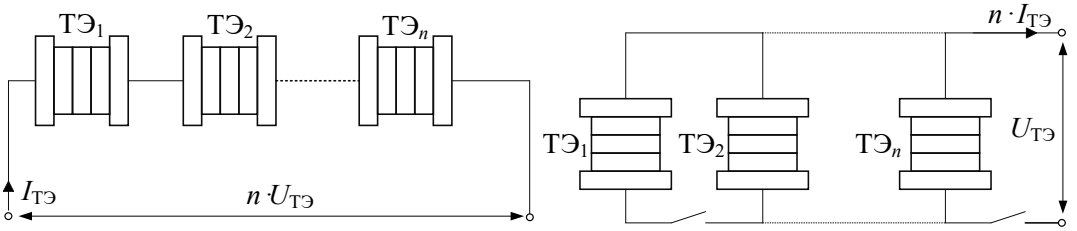
Одна из стратегических задач современной российской энергетики связана с расширением использования водорода. В Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года [1] водород, который в настоящее время востребован, в основном, в химической и нефтехимической промышленности, рассматривается в качестве перспективного энергоносителя, способного дополнить углеводородные энергоносители в рамках формирования "водородной экономики". Согласно Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации [2] к первостепенным этапам становления данного направления относятся развитие научно-технической базы и методологии применения водородных энергоустановок.

Наиболее перспективными установками для производства электроэнергии из водорода считаются топливные элементы (ТЭ) [3], которые уже в настоящее время характеризуются высоким потенциалом для применения в системах электроснабжения объектов арктических территорий, потребителей вдоль магистральных газопроводов, а также в местах развития водородных кластеров.

Энергоустановки, объединяющие несколько ТЭ, получили название мультистеки. Применение мультистеков по сравнению с использованием одного более мощного ТЭ позволяет повысить маневренность энергоустановки, увеличить ее время автономной работы и возможный срок эксплуатации. Однако для достижения указанных результатов актуальным является разработка интеллектуальных систем управления (СУ), обеспечивающих оптимальное распределение нагрузки и времени работы ТЭ с учетом их особенностей [4-5].

Объектом исследования является мультистек, состоящий из двух одинаковых ТЭ с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ). Статья посвящена разработке и исследованию алгоритмов СУ, направленных на экономию водорода и увеличение срока службы энергоустановки.

Аналитический обзор схемных решений и систем управления мультистеками. Для разработки структуры мультистека проведен анализ возможных схемных решений объединения ТЭ в мультистеке. Выделены две основные схемы: последовательная (рис. 1, а) и параллельная (рис. 1, б) [6].



а ***б***

Рис. 1. Схемы соединений ТЭ в мультистеке: (а) последовательное соединение ТЭ; (б) параллельное соединение ТЭ: n – количество ТЭ; $U_{ТЭ}$ – выходное напряжение мультистека; $I_{ТЭ}$ – выходной ток мультистека

Последовательная схема характеризуется относительной простотой, но не позволяет управлять конкретным ТЭ. Параллельная схема соединения ТЭ обладает большей надежностью и потенциалом по эффективности, поскольку позволяет управлять каждым ТЭ в отдельности [7].

Для согласования выходных параметров ТЭ между собой в составе мультистека используются преобразователи постоянного тока (DC-DC преобразователи). На рис. 2 представлены варианты согласования выходных параметров ТЭ при их параллельном соединении [6].

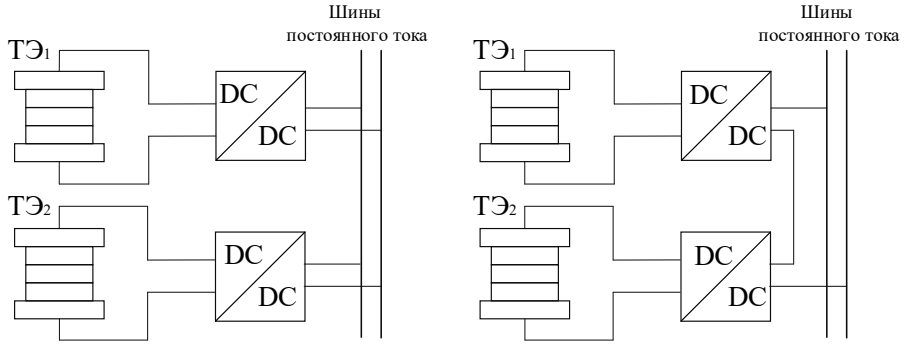
Наибольшими преимуществами обладает схема с индивидуальным DC-DC преобразователем (рис. 2(а)), поскольку позволяет управлять любым ТЭ и выводить при необходимости часть ТЭ и преобразователей из работы. Данное схемное решение положено в основу мультистека, который будет рассматриваться в качестве объекта исследования.

Задачи СУ заключаются в обеспечении надежной и эффективной работы мультистека путем динамического распределения нагрузки между входящими в его состав ТЭ. В зависимости от принципов принятия решений можно выделить 2 группы алгоритмов СУ.

1.Алгоритмы, основанные на теории конечных автоматов. Алгоритмы из данной группы предполагают распределение мощности между ТЭ на основе заранее определенных правил. При этом можно выделить детерминированные алгоритмы и алгоритмы, основанные на нечеткой логике [8-10].

Детерминированные алгоритмы предполагают распределение мощности нагрузки в соответствии с определенной закономерностью, например, равномерное распределение между всеми ТЭ [11], распределение мощности последовательно по ТЭ и др. [12-13]. Такие алгоритмы являются наиболее простыми для технической реализации, но не позволяют корректировать настройки СУ в процессе работы.

Алгоритмы, основанные на нечеткой логике, отличаются большей надежностью, быстродействием и ориентированы на использование в сложных системах. Однако для эффективной работы этот подход требует настройки многих параметров и значительных вычислительных ресурсов.



а *б*

Рис. 2. Применение DC-DC преобразователей для согласования выходных параметров ТЭ в мультистеке: (а) параллельное подключение ТЭ с индивидуальным DC-DC преобразователем; (б) каскадное соединение ТЭ с DC-DC преобразователями

2. Алгоритмы, основанные на оптимизационных методах. Такие алгоритмы предполагают управление мультистеком путем решения оптимизационных задач. В данной группе можно выделить алгоритмы глобальной оптимизации и алгоритмы оптимизации в реальном времени.

К особенностям алгоритмов глобальной оптимизации, таких как динамическое программирование [14], алгоритм роя частиц [15], относятся значительные временные затраты для расчета уравнений, что затрудняет их использование в СУ мультистеков при увеличении количества ТЭ.

В основе алгоритмов оптимизации в реальном времени лежат технологии машинного обучения, например, искусственных нейронных сетей [16-20]. Подобные алгоритмы дают возможность настраивать работу мультистека с учетом изменения характеристик отдельных ТЭ вследствие деградации или влияния внешних факторов (например, температуры), что в итоге может позволить повысить эффективность и ресурс работы мультистека.

Целью работы является проведение экспериментальных исследований различных стратегий управления мультистеком и разработка подхода, направленного на создание модифицированных алгоритмов, сочетающих детерминированный подход и оптимизацию в реальном времени для повышения качества управления мультистеком.

Объект исследования. На рис. 3 представлена структурная схема исследуемого мультистека, состоящего из двух одинаковых ТЭ мощностью 1 кВт каждый.

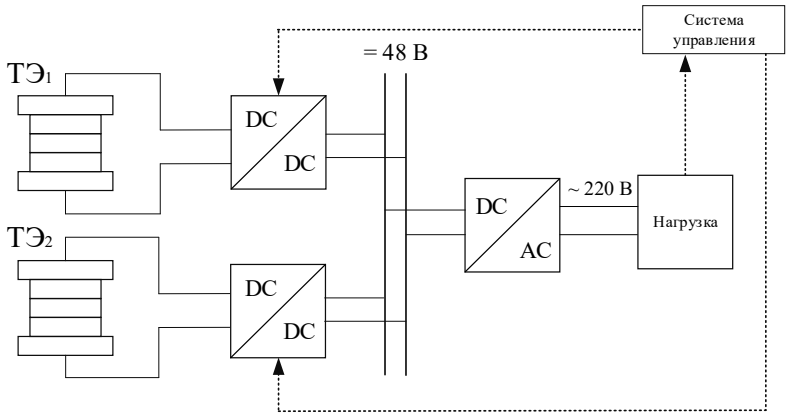


Рис. 3. Структурная схема исследуемого мультистека

В основу дальнейших исследований положены данные о выходных характеристиках реального ТЭ (вольтамперная характеристика и зависимость расхода водорода от загрузки), полученные путем экспериментальных исследований ТЭ на специальном стенде [22] (рис. 4).

На основе полученных характеристик ТЭ (рис. 4) разработана математическая модель мультистека и выполнено моделирование его работы при питании нагрузки мощностью от 0 до 2 кВт с шагом 0,1 кВт. Цель моделирования заключалась в определении для каждой мощности нагрузки ее оптимального распределения между двумя ТЭ, при котором будет достигаться минимальное потребление водорода мультистеком:

$$F = f(P_{\text{нагр}}) \rightarrow \min,$$

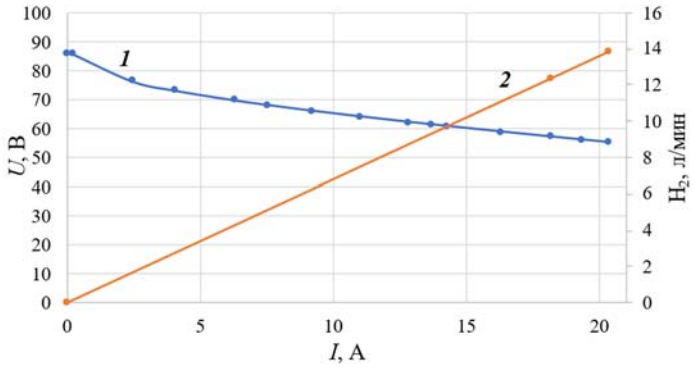
где $P_{\text{нагр}}$ – мощность нагрузки (Вт); F – расход водорода мультистеком (л/мин).

Результаты моделирования для некоторых значений нагрузки приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что наименьшее потребление водорода мультистеком достигается при равномерном распределении мощности нагрузки между обоими ТЭ. Однако кроме минимизации расхода водорода важной задачей

является продление срока эксплуатации мультистека. Поэтому в статье рассматривается также вторая стратегия управления, направленная на сохранение ресурса ТЭ за счет их периодического отключения.

а



б

Рис. 4. Экспериментальные исследования топливного элемента на стенде: (а) фото исследовательского стенда: 1 – топливный элемент; 2 – система подачи водорода; 3 – блок регулятора расхода; 4 – блок системы регулирования и измерений; (б) полученные характеристики топливного элемента: 1 – вольт-амперная характеристика; 2 – расход водорода

Таблица 1

Результаты математического моделирования работы мультистека

Загрузка ТЭ, Вт		Суммарный расход водорода, л/мин
ТЭ №1	ТЭ №2	
$P_{нагр}$ = 500 Вт		
500	0	9,41
250	250	8,47
$P_{нагр}$ = 1000 Вт		
1000	0	12,21
500	500	10,17
$P_{нагр}$ = 1500 Вт		
1000	500	24,72
750	750	23,26
$P_{нагр}$ = 1900 Вт		
1000	900	32,18
950	950	32,12

Алгоритмы управления мультистеком. На основе результатов математического моделирования для рассматриваемого мультистека разработан алгоритм управления, обеспечивающий наименьший расход водорода и, соответственно, наибольшее время автономной работы мультистека (рис. 5, а).

В соответствии с алгоритмом СУ получает данные о мощности нагрузки ($P_{нагр}$), далее мощность нагрузки распределяется поровну между обоими ТЭ. На выходе формируются данные о фактической загрузке каждого ТЭ (P_1, P_2).

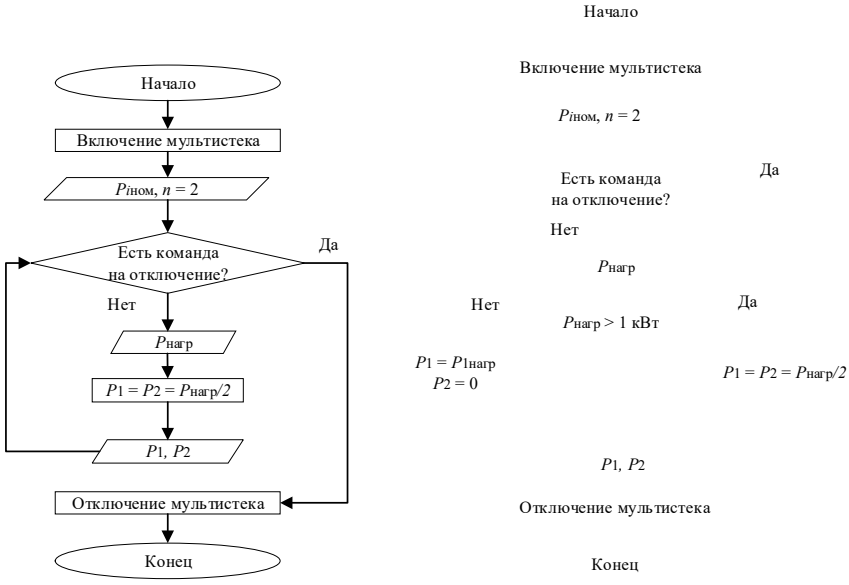
Существенный недостаток такой стратегии управления заключается в том, что часть времени ТЭ могут работать с низкой загрузкой. В этом случае для сохранения ресурса ТЭ целесообразным представляется периодические отключения ТЭ (с частотой и продолжительностью, не усиливающими их деградацию).

Для исследуемого мультистека установлено, что при мощности нагрузки до 1 кВт в работе может оставаться только один ТЭ, что позволит отключать второй ТЭ.

Блок-схема алгоритма управления, направленного на продление срока эксплуатации мультистека показана на рис. 5, б.

При использовании данного алгоритма управления режим работы мультистека определяется значением мощности нагрузки. При мощности нагрузки менее 1 кВт в работе остается один ТЭ, а второй ТЭ может быть полно-

стью отключен (или работать на холостом ходу). При мощности нагрузки более 1 кВт нагрузка делится между двумя ТЭ поровну.



а б

Рис. 5. Блок-схема алгоритма управления: (а) обеспечивающего наименьший расход водорода; (б) направленного на продление срока эксплуатации мультистека: $P_{iном}$ – номинальная мощность i-го ТЭ; n – количество ТЭ; $P_{нагр}$ – мощность нагрузки; P_1 – фактическая загрузка 1-го ТЭ; P_2 – фактическая загрузка 2-го ТЭ; P_{1max} – максимальная загрузка 1-го ТЭ

***Simulink*-модель мультистека.** Для исследования эффективности применения предложенных алгоритмов управления в программе *Matlab R2020b/Simulink* разработана имитационная компьютерная модель мультистека (рис. 6).

Для моделирования ТЭ использован блок *Fuel Cell Stack*. Регулирование подачи водорода на вход ТЭ осуществляется с помощью обратной связи по току.

На выходе ТЭ установлены понижающие преобразователи постоянного тока (*DC/DC Buck converter*), которые понижают выходное напряжение ТЭ до 48 В. Преобразователь первого ТЭ работает в режиме стабилизации выходного напряжения, поддерживая напряжение 48 В на шине постоянного тока, в то время как второй преобразователь работает в режиме поддержания выходного тока, определяя распределение тока между стеками.

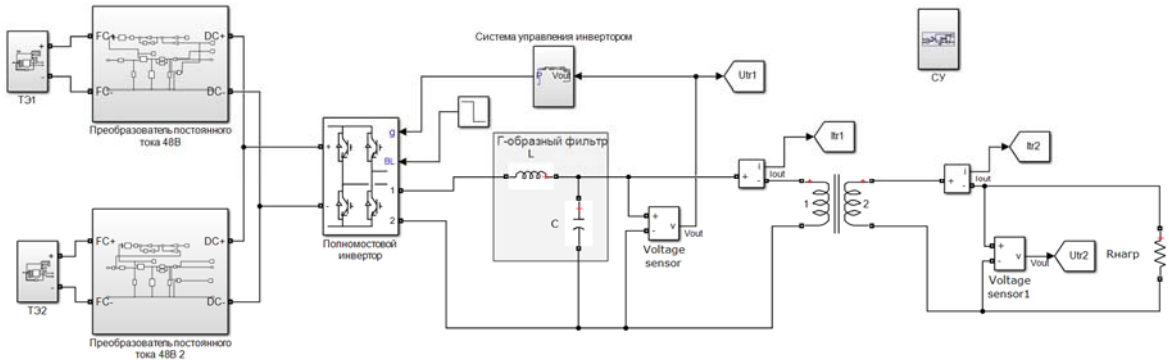
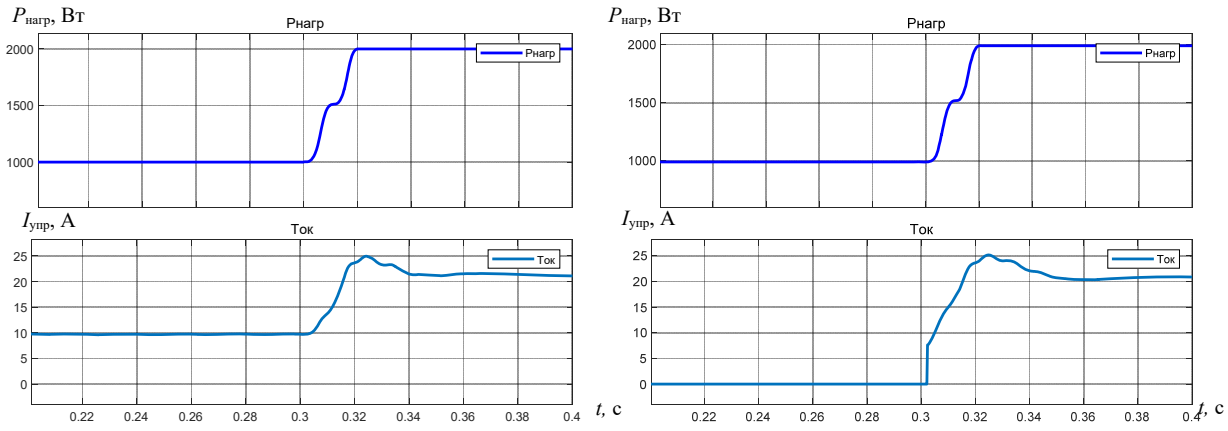


Рис. 6. Simulink-модель мультистека

Постоянное напряжение с шин поступает на полномостовой инвертор и Г-образный фильтр, после которых установлен повышающий трансформатор 48/220 В. Система управления инвертором обеспечивает значения напряжения на нагрузке в заданных пределах. Нагрузка электроприемников моделируется активным сопротивлением.

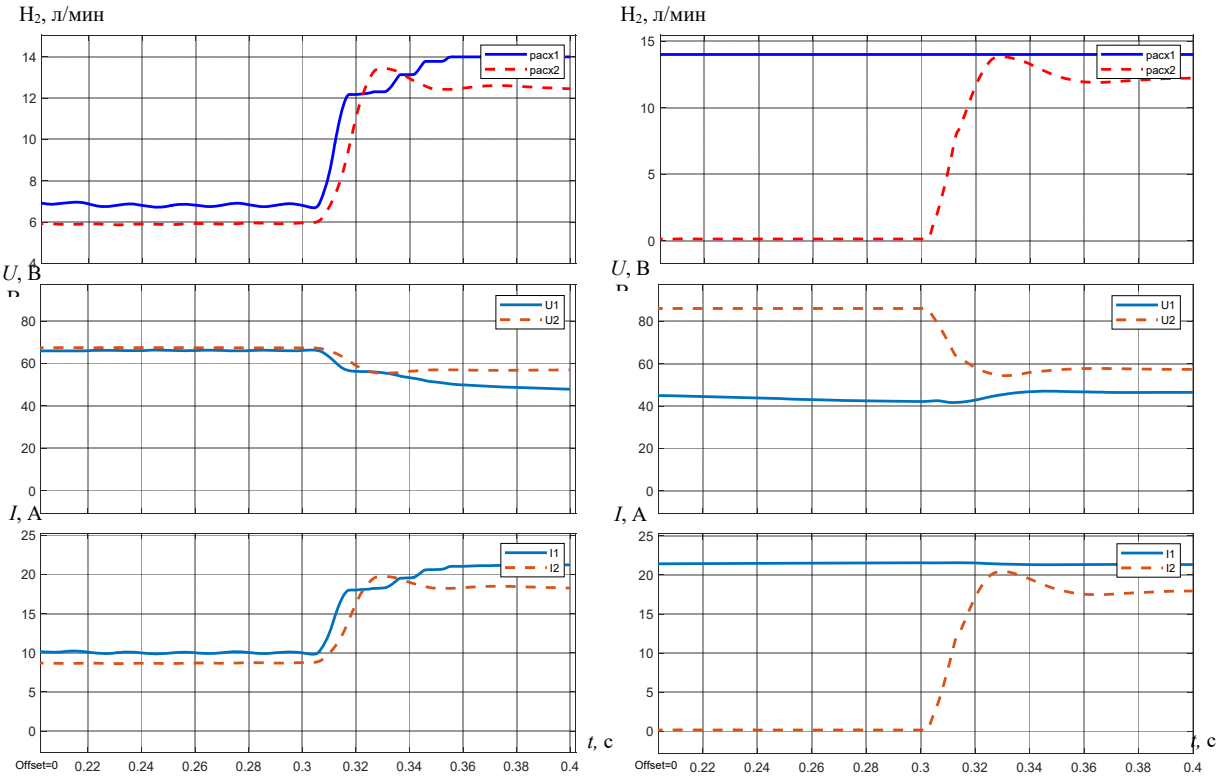
На рис. 7 и 8 приведены результаты моделирования работы мультистека при изменении мощности нагрузки с 1000 Вт до 2000 Вт. На рис. 7 показан сигнал управления, подаваемый на преобразователь постоянного тока второго ТЭ; на рис. 8 представлены расходы водорода, выходные напряжения и токи ТЭ.

Для корректной работы *Simulink*-модели мультистека в алгоритме управления учтены не только мощность нагрузки, но и значения потерь в элементах схемы. Из приведенных на рис. 8 графиков видно, что нагрузка делится поровну между ТЭ, значения токов и напряжений на выходе ТЭ совпадают, что соответствует работе мультистека в режиме, обеспечивающим наименьший расход водорода.



а *б*

Рис. 7. Сигнал управления, подаваемый на преобразователи постоянного тока ТЭ: (а) при использовании алгоритма минимизации расхода водорода; (б) при использовании алгоритма продления срока эксплуатации; $P_{нагр}$ – мощность нагрузки; $I_{упр}$ – сила тока, подаваемая на преобразователь постоянного тока второго ТЭ



а *б*

Рис. 8. Выходные напряжения и токи ТЭ при изменении мощности нагрузки с 1000 Вт до 2000 Вт: (а) при использовании алгоритма минимизации расхода водорода; (б) при использовании алгоритма продления срока эксплуатации; U_1, U_2 – напряжение на выходе первого и второго ТЭ; I_1, I_2 – сила тока на выходе первого и второго ТЭ

Исследование алгоритмов управления мультистеком. С помощью *Simulink*-модели выполнены исследования предложенных алгоритмов управления мультистеком. Принято допущение, что мультистек работает в течение суток (24 ч) и питает нагрузку, график нагрузки (ГН) которой приведен на рис. 9.

Выполнено имитационное моделирование работы мультистека при использовании двух предложенных алгоритмов управления (рис. 5). В качестве критериев эффективности использован суточный расход водорода мультистеком и возможная длительность отключения одного из ТЭ (табл. 2).

Установлено, что для заданного графика нагрузки использование алгоритма управления, направленного на минимизацию потребления водорода, позволит обеспечить экономию топлива около 544,5 л в сутки. При использовании алгоритма минимизации расхода водорода удается снизить расход на 3% по сравнению с алгоритмом продления срока эксплуатации. Однако, при использовании второго алгоритма в течение 12 часов в работе может находиться только один ТЭ (второй топливный элемент может быть отключен с целью сохранения ресурса работы).

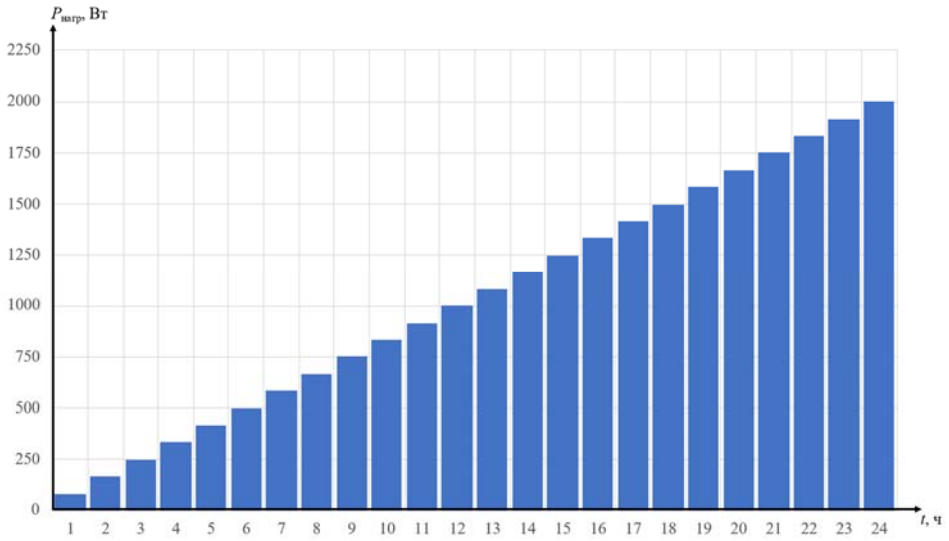


Рис. 9. График нагрузки

Таблица 2

Сравнение эффективности алгоритмов управления мультистеком

$P_{нагр}$, Вт	Количество работающих ТЭ (n) / потребление водорода мультистеком (F), л/мин		$F_2 - F_1$, л/мин	Экономия, л
	алгоритм продления срока эксплуатации	алгоритм минимизации расхода водорода		
100	1 / 1,004	2 / 0,928	0,0754	5,434
200	1 / 2,137	2 / 1,999	0,138	9,944
300	1 / 3,496	2 / 3,1276	0,369	26,582
400	1 / 4,940	2 / 4,341	0,598	43,113
500	1 / 6,362	2 / 5,700	0,662	47,720
600	1 / 7,913	2 / 7,028	0,885	63,747
700	1 / 9,442	2 / 8,414	1,027	73,974
800	1 / 10,986	2 / 9,877	1,108	79,822
900	1 / 12,505	2 / 11,326	1,178	84,884
1000	1 / 14,331	2 / 12,813	1,517	109,250
1100	2 / 14,225	2 / 14,225	0	0
1200	2 / 15,762	2 / 15,762	0	0
1300	2 / 17,313	2 / 17,313	0	0
1400	2 / 18,820	2 / 18,820	0	0
1500	2 / 20,381	2 / 20,381	0	0
1600	2 / 21,886	2 / 21,886	0	0
1700	2 / 23,309	2 / 23,309	0	0
1800	2 / 24,778	2 / 24,778	0	0
1900	2 / 26,620	2 / 26,620	0	0
2000	2 / 27,548	2 / 27,548	0	0
Итого				544,475

Дискуссия. Особенностью работы ТЭ является зависимость выходных характеристик (вольт-амперной, мощностной характеристик, КПД, потребления водорода) от внешних факторов (например, температуры) и деградационных процессов (внутренних факторов). Это приводит к тому, что фактическая мощность ТЭ и расход водорода могут отличаться от планируемых значений, а границы областей, в которых работа ТЭ не эффективна или не допустима, будут смещены. С учетом этого можно выделить следующие задачи, решение которых необходимо для повышения точности управления режимами работы мультистека.

1. Прогнозирование текущих выходных характеристик ТЭ в составе мультистека. В данной статье при математическом и имитационном компьютерном моделировании были использованы полностью совпадающие выходные характеристики ТЭ (идеализированный вариант). При реальной эксплуатации мультистека выходные характеристики ТЭ в его составе будут отличаться и их отличие будет заметно усиливаться с течением времени. С помощью *Simulink*-модели была проведена серия исследований, результаты которых показали, что для различных выходных характеристик ТЭ оптимальные соотношения распределяемой между ТЭ мощности нагрузки будут отличаться. При этом единая закономерность распределения мощности нагрузки отсутствовала. Таким образом, для точного принятия решения о распределении мощности нагрузки СУ должна оперировать характеристиками ТЭ, наиболее приближенными к реальным в данный момент.

2. Прогнозирование текущей максимально допустимой загрузки ТЭ в составе мультистека. Преобразователи постоянного тока, подключенные к выходам ТЭ рассчитаны на работу в определенном диапазоне входного напряжения. В процессе неизбежной деградации вольт-амперная характеристика ТЭ отклоняется вниз по сравнению с первоначальной. Это будет приводить к тому, что значения выходного тока ТЭ, соответствующие минимально допустимому входному напряжению преобразователей, будут постепенно уменьшаться. Для обеспечения надежной работы и непрерывного питания потребителей СУ мультистека должна иметь возможность корректировки максимально допустимой загрузки ТЭ.

3. Сохранение ресурса ТЭ при его отключении. Известно, что отключение/включение ТЭ, а также длительное пребывание ТЭ в отключенном состоянии, усиливают внутренние деградационные процессы [21]. Поэтому, чтобы не получить обратный эффект, требуется точная настройка СУ, позволяющая отключать ТЭ с периодичностью и длительностью, негативное влияние на ресурс ТЭ от которых будет меньше, чем полученный запас времени работы.

Для решения данных задач актуальным является разработка и исследование модифицированного алгоритма СУ мультистека, сочетающего детерминированный подход и оптимизацию в реальном времени с использованием нейросетевых технологий.

Заключение. На основе экспериментальный исследований реального ПОМТЭ и результатов математического моделирования работы мультистека разработаны два алгоритмы управления мультистеком. Работа одного алгоритма направлена на снижение суммарного расхода водорода, работа второго – на продление срока эксплуатации мультистека.

С помощью *Simulink*-модели проведены исследования предложенных алгоритмов управления мультистеком и рассмотрена эффективность их применения.

Определены дальнейшие задачи исследования, направленные на улучшение точности управления режимами работы мультистека.

Исследование выполнено в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (тема №FSWE-2022-0005).

Список литературы

1.Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 года. Утв. расп. Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р.

2. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Утв. расп. Правительства РФ от 5 августа 2021 г. № 2162-р.

3. Бедретдинов Р.Ш. Экономическая оценка эффективности применения гибридного энергетического комплекса на основе водорода // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 47-58.

4. Garcia J.E., Herrera D.F., Boulon L., Sicard P., Hernandez A. Power sharing for efficiency optimisation into a multi fuel cell system // IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2014, P. 218-223.

5. Wang T., Li Q., Yang H., Yin L., Wang X., Qiu Y., Chen W. Adaptive current distribution method for parallel-connected PEMFC generation system considering performance consistency // Energy Conversion and Management. 2019. V. 196. P. 866-877.

6. Marx N., Boulon L., Gustin F., Hissel D., Agbossou K. A review of multi-stack and modular fuel cell systems: Interests, application areas and on-going research activities // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. V. 39(23). P. 12101–12111.

7. Garnier J., De Bernardinis A., Péra M.-C., Hissel D., Candusso D., Kauffmann, J.-M., & Coquery, G. Study of a PEFC power generator modular architecture based on a multi-stack association // Journal of Power Sources. 2005. V. 156(1). P. 108-113.

8. Arabul K., Arabul F., Kumru A.Y., Boynuegri A.R. Providing energy management of a fuel cell-battery-wind turbine-solar panel hybrid off grid smart home system // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. V. 42(43). P. 26906–26913.

9. Vivas F.J., Segura F., Andújar J.M. Fuzzy logic-based energy management system for grid-connected residential DC microgrids with multi-stack fuel cell systems: A multi-objective approach // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2022. V. 32. 100909.

10. Garcia J.E., Herrera D.F., Boulon L., Sicard P., Hernandez A. Power sharing for efficiency optimisation into a multi fuel cell system // 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2014. P. 218-223.

11. Qiu Y., Zeng T., Zhang C., Wang G., Wang Y., Hu Z., Yan M., Wei Z. Progress and challenges in multi-stack fuel cell system for high power applications: Architecture and energy management // Green Energy and Intelligent Transportation. 2023. V. 2(2). 100068.

12. Li X., Shang Z., Peng F., Li L., Zhao Y., Liu Z. Increment-oriented online power distribution strategy for multi-stack proton exchange membrane fuel cell systems aimed at collaborative performance enhancement // Journal of Power Sources. 2021. V. 512. 230512.

13. Becherif M., Claude F., Hervier T., Boulon L. Multi-stack fuel cells powering a vehicle // Energy Procedia. 2015. V. 74. P. 308-319.

14. Roche R., Idoumghar L., Blunier B., Miraoui A. Optimized fuel cell array energy management using multi-agent systems // 2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 2011. P. 1-8.

15. Herr N., Nicod J.-M., Varnier C., Jardin L., Sorrentino A., Hissel D., Péra M.-C. Decision process to manage useful life of multi-stacks fuel cell systems under service constraint // Renewable Energy. 2017. V. 105. P. 590–600.

16. Garcia-Torres F., Bordons C., Ridao M.A. Optimal economic schedule for a network of microgrids with hybrid energy storage system using distributed model predictive control // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. V. 66(3). P. 1919-1929.

17. Vivas F.J., Segura, F., Andújar, J.M., Caparrós, J.J. A suitable state-space model for renewable source-based microgrids with hydrogen as backup for the design of energy management systems // Energy Conversion and Management. 2020. V. 219. 113053.

18. Long R., Quan S., Zhang L., Chen Q., Zeng C., Ma L. Current sharing in parallel fuel cell generation system based on model predictive control, International Journal of Hydrogen Energy. 2015. V. 40(35). P. 11587–11594.

19. Choe G.-Y., Kang H.-S., Lee B.-K., Hur J. A parallel operation algorithm with power-sharing technique for FC generation systems // 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2009. P. 725-731.

20. Wang T., Li Q., Yang H., Yin L., Wang X., Qiu Y., Chen W. Adaptive current distribution method for parallel-connected PEMFC generation system considering performance consistency // Energy Conversion and Management. 2019. V. 196. P. 866–877.

21. Дарьенков А.Б., Шалухо А.В., Шувалова Ю.Н. Анализ процессов деградации в мембрано-электродном блоке топливного элемента с полимерной протонообменной мембраной // Фёдоровские чтения — 2022: LII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, с элементами научной школы для молодежи. 2022. С. 288-294.

22. Loskutov A., Kurkin A., Shalukho A., Lipuzhin I., Bedretdinov R. Investigation of PEM Fuel Cell Characteristics in Steady and Dynamic Operation Modes // Energies. 2022. V. 15(19).

Шалухо Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий Молодежной научно-исследовательской лабораторией по разработке перспективных систем накопления энергии, shaluho@nntu.ru, Россия, Нижний Новгород, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,

Липужин Иван Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, lipuzhin@nntu.ru, Россия, Нижний Новгород, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,

Шувалова Юлия Николаевна, техник научно-исследовательской лаборатории, yulia.shuvalova2017@yandex.ru, Россия, Нижний Новгород, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF CONTROL ALGORITHMS OF POWER SYSTEM BASED ON SEVERAL HYDROGEN FUEL CELLS

A.V. Shalukho, I.A. Lipuzhin, Y.N. Shuvalova

The article is dedicated to the development of algorithms for controlling power system with two hydrogen fuel cells with the same characteristics. Mathematical modeling of the power system operation is performed and the optimal loading of fuel cells over the all load capacity range is determined. Two control algorithms are developed: minimizing hydrogen consumption and extending the life of the power sources. A Simulink model of the power system and its control system is developed. A comparison of hydrogen consumption by the power system with the developed algorithms is performed. Further directions for improving control algorithms are determined.

Key words: hydrogen fuel cell, multi-stack, simulation model, mathematical model, control system.

Shalukho Andrey Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, director of the Youth research laboratory for the engineering of advanced energy storage systems, shaluho@nntu.ru, Russia, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,

Lipuzhin Ivan Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, senior researcher, lipuzhin@nntu.ru, Russia, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,

Shuvalova Yulia Nikolaevna, technician of the research laboratory, yulia.shuvalova2017@yandex.ru, Russia, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

УДК 621.311
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-393-394

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КОМПЕНСАТОРОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Д.В. Неподоба, М.Э. Аблязимов, А.С. Бордюг

В данной статье рассмотрены виды энергосистем и показано важность влияния искажений на их работу. Также рассмотрены технические средства, а именно различные компенсаторы и их корректирующее воздействие на присутствующие искажения в системе, объединенных под общим именем - FACTS (Гибкие системы передачи переменного тока). Эти системы позволяют адаптивно регулировать основные системные параметры передачи переменного тока и в реальном времени добиваться наилучших характеристик передачи мощности. Другими словами, технологии FACTS увеличивают гибкость энергосистем, делая их более управляемыми и надежными. Основная идея большинства систем FACTS основана на хорошо известных принципах продольной и поперечной компенсации реактивных параметров передачи электроэнергии. Применение быстродействующих тиристорных ключей и микропроцессорных систем управления позволило перейти от медленного и дискретного оперативного управления к плавному автоматическому регулированию реактивных параметров передачи с достаточной для управления режимами при прохождении переходных процессов в энергосистемах. Идея использования последовательного компенсатора линии электропередачи УПК позволяет изменять суммарное сопротивление цепи и, следовательно, влиять на распределение мощности по двум линиям связи. Если установить продольный компенсатор, который по сути является плавно и быстро регулируемым УПК, появляется возможность гибко управлять режимами работы связи между энергосистемами, изменяя сопротивление такого компенсатора.

Ключевые слова: надежность, электропитание, нелинейная нагрузка.

Гибкость управления заключается в том, что в зависимости от генерации и потребления в каждой из энергосистем, меняющихся со временем, можно непрерывно в автоматическом режиме корректировать сопротивление передачи для достижения поставленной цели регулирования. Например, обеспечение минимума потерь

электроэнергии в нормальных режимах или подавление низкочастотных колебаний мощности при переходных процессах. Классификация систем FACTS может быть проведена в соответствии с типом компенсации: системы продольной компенсации, системы поперечной компенсации и комплексные системы, объединяющие продольную и поперечную компенсацию. Основными преимуществами внедрения технологий FACTS в электроэнергетику (см. таблицу 1) являются:

повышение экономической эффективности перспективного развития сетей;

увеличение пропускной способности существующих сетей; улучшение статической и динамической устойчивости;

подавление низкочастотных колебаний мощности;

эффективное управление напряжением, потоками активной и реактивной мощности в сложных замкнутых сетях в соответствии с транзакциями энергорынка или программами экспорта-импорта электроэнергии;

повышение надежности;

снижение потерь электроэнергии;

сокращение общего времени регулирования.

Таблица 1

Преимущества внедрения технологий FACTS в электроэнергетику

Тип компенсатора	Управление уровнем напряжения	Управление потоками и мощностью	Улучшение статической устойчивости	Улучшение динамической устойчивости
SVC	+		+	+
STATCOM	+		+	+
UPFC	+	+	+	+
TCSC		+	+	+
TCR		+		
TCPAR		+	+	

На первом этапе осуществляется оптимизация распределения мощности и определение "задач" для потребителей на основе определенной системы критериев. На втором этапе на уровне потребителей энергии обеспечивается управление в реальном времени с учетом согласованных "задач".

Были проведены параллели между западными и нашими технологиями, и попытаемся выяснить, как эти устройства будут себя вести на примере нашей энергосистемы.

Рассмотрим на примере схему Генератор (Г) + Нагрузка (Н) + Компенсатор (К).

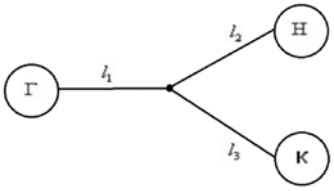


Рис. 1. Схема энергосистемы

Оценка влияния изменения параметров элементов системы практически сводится к использованию функций чувствительности и анализу устойчивости в малом. Для моделей цепей с n > 1 и m > 2 влияние изменения параметров и сигналов нескольких генераторов и нагрузок на выделенный элемент можно оценить с использованием следующих формул на основе функций чувствительности:

$$\Delta\gamma = \sum_{i=1}^{n_{\text{пс}}} \Delta q_i \partial\gamma/\partial q_i = \sum_{i=1}^{n_{\text{пс}}} \mathrm{A}_i \Delta q_i; \quad (1)$$

$$\Delta\gamma/\gamma = \sum_{i=1}^{n_{\text{пс}}} \mathrm{S}_{qi} \delta q_i, \quad (2)$$

где Δγ - изменение сигнала γ на выделенном элементе системы; ΔAq - изменения выделенного i-го параметра или сигнала генераторов и нагрузок системы; ппе - количество выделенных элементов и сигналов; Ai - коэффициенты влияния; dq; = Aqilqi - относительное изменение i-го параметра или сигнала; Sqi = (gi/y)(dγ/dg) - функция чувствительности.

Без нарушения обобщения системы относительно узла, к которому подключается компенсатор (К), представим соединение генератора (Г) и нагрузки (Н). Для такой системы можно выделить варианты, сведенные в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные варианты для системы Г+Н+К

№ варианта	Генератор Г	Нагрузка Н	Компенсатор К
1	$u_1(t)$	$i_1(t) + i_\infty(t)$	$i_1(t) + i_\infty(t)$
2	$u_1(t) + u_\infty(t)$	$i_1(t) + i_\infty(t)$	$i_1(t) + i_\infty(t)$

Для оценки обменных процессов по реактивному току *ip*(*t*) используем обменную мощность *Q*об. Важно отметить, что для синусоидальных колебаний справедливо соотношение *Q*1=10*Q*об (вариант 1, таблица 1). Для анализа искажений в вариантах 1 и 2 (см. таблицу 2) обменные процессы в узле для заданного активного напряжения генератора *u*(*t*) разделим на следующие гармоники: по первой (индекс "1"), j-ой высшей (индекс "j"), всем высшим (индекс "о") и всем (индекс "2") гармоникам в соответствии с следующими выражениями:

Анализ воздействия искажений на основе обменных процессов позволяет:

анализировать обменные процессы при наличии в системе разноименных гармоник;

анализировать обменные процессы, когда отдельные фрагменты системы (макромодели) могут быть представлены источниками напряжения и тока (идеальными и/или реальными);

анализировать обменные процессы на высших гармонических составляющих напряжения и систем постоянного тока;

отказаться от идентификации параметров моделей, включая параметры *Z*(*nw*) и *Y*(*nw*) для каждой частоты, кратной основной (не требуется изменение параметров моделей, когда их элементы меняются с течением времени).

Для оценки воздействия искажений на ухудшение качества электроэнергии в системе можно предложить два подхода. Первый основан на использовании алгоритма оценки взаимного влияния элементов с выделением вклада элемента в искажения электроэнергии в выбранном узле и анализе величины влияния искажающих факторов на электромагнитные процессы в элементе системы. Влияние элементов системы оценивается независимо от предыдущих режимов работы как системы в целом, так и ее конкретных элементов, а количественные показатели взаимного влияния определяются суммой влияний для каждого из выделенных факторов несовершенства электроэнергии с учетом критерия минимизации потерь электроэнергии. Выделение вклада j-го элемента в искажения электроэнергии в узле системы предполагает формирование интегральной модели оценки взаимного влияния и разложение модели системы на две ортогональные компоненты, отражающие соответственно протекание активного и реактивного токов. Затем производится расчет обменных мощностей в разложенной модели на основе реактивной составляющей тока согласно соотношениям (1) - (4), и определяется долевой вклад для j-го элемента.

$$\Delta_{Qв,j} = Q_{ОБ,j}/Q_{ОБS}, \quad (3)$$

Во-первых, QoБ*j* представляет собой изменение обменной мощности через перетин при подключении j-го элемента к системе, а *nj* - количество элементов системы, подключенных к выделенному узлу.

$$Q_{ОБS} = \sum_{j=1}^{n_{ЕУ}} Q_{ОБ,j}; \sum_{j=1}^{n_{ЕУ}} \Delta_{Qв,j} = 1. \quad (4)$$

Второй подход предусматривает оценку изменения обменных мощностей как функций отдельных изменяемых параметров. Например, согласно коэффициенту влияния (чувствительности) *Sj* изменения обменной мощности *Q*обj. -го элемента от изменения параметра *Po*-го элемента системы:

$$k_{Q,П} = S_j^i = \frac{\Delta Q_{ОБ,i}}{\Delta П_j}.$$

При оценке влияния режимов работы компенсатора К на нагрузку Н в случае изменения их гармонических спектров тока на входах (изменения спектров {Δ*Sk*} и {Δ*Sh*}), приводящего к изменению обменных мощностей в узле соответственно на *Qоб* и Δ*Q*об *s*1, целесообразно использовать коэффициент влияния *ko*,*s*=Δ*Qo*,*s*2/ Δ*Qo*,*s*1 . При этом множества изменений спектров {Δ*Sk*} и {Δ*Sh*}включают как одноименные, так и разноименные гармоники сигналов. Для анализа влияния режимов работы компенсатора *K* на нагрузку *H* в течение интервала времени Δ*t*=*t*2 −*t*1, коэффициент влияния определяется согласно следующему соотношению:

$$k_{Q,t} = (Q_{ОБ,Н1(t2)} - Q_{ОБ,Н1(t1)})/(Q_{ОБ,Н2(t2)} - Q_{ОБ,Н2(t1)}), \text{где } Q_{ОБ,Н1(t1)} \text{ и } Q_{ОБ,Н2(t2)} \quad (5)$$

где значения обменных мощностей нагрузки *H* в моменты времени *t*1 и *t*2;$Q_{ОБ,Н2(t1)}$ и $Q_{ОБ,Н2(t2)}$ − значения обменных мощностей компенсатора *K* в моменты времени *t*1 и *t*2.

Анализ влияния факторов неудовлетворительного качества электроэнергии на *j*-й элемент может осуществляться для исходной модели системы и оцениваться аналогичным алгоритмом. Для этого целесообразно использовать коэффициенты влияния.

В качестве примера рассмотрим оценку влияния искажений для выделенной системы согласно первому подходу. Проведем анализ обменных процессов для системы, где к генератору Г подключено нагрузка Н и компенсатор К. Напряжение генератора $u(t) = U_{m(1)}\sin(\omega t)$; соответственно равны

$$i(t)_B = I_{1Bm}\sin(\omega t + \varphi_{1B}) \text{ и } i(t)_C = I_{1Cm}\sin(\omega t + \varphi_{1C}) + K_{I,H2}I_{1Cm}\sin(3\omega t + \varphi_{3C}).$$

В этом случае ток генератора. Для анализа обменных процессов определим реактивный ток компенсатора

$$K: i_p(t) = I_{m(1)}\sin(\psi_1^i)\cos(\omega t) + I_{m(3)}\sin(3\omega t + \psi_3^i).$$

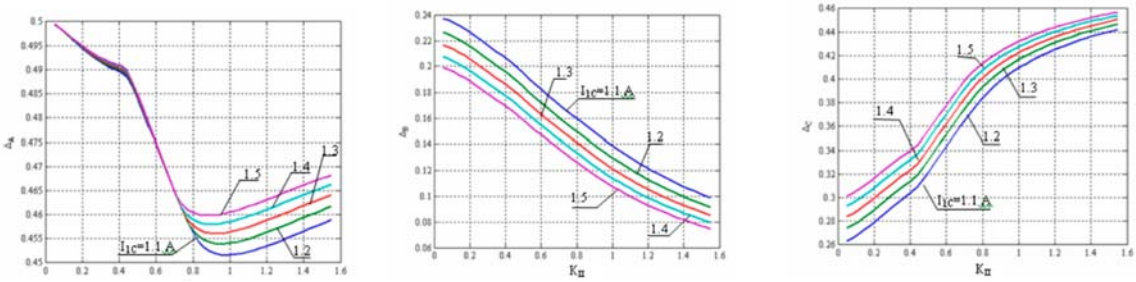


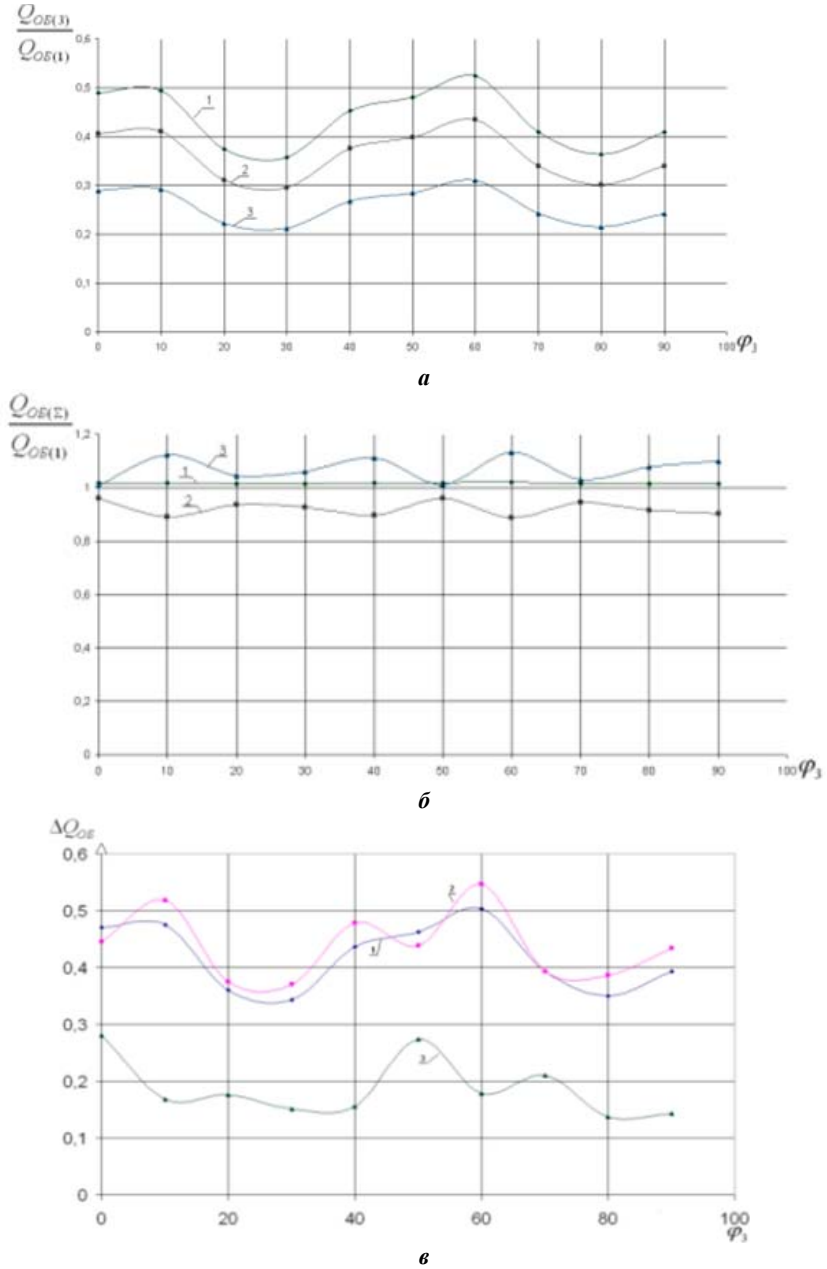
Рис. 2. Зависимость коэффициентов взаимного влияния $\Delta_A, \Delta_B, \Delta_C$ от изменения коэффициента пульсации Кр

Графики на рис. 2,а показывают зависимость коэффициентов взаимного влияния $\Delta_A, \Delta_B, \Delta_C$ (согласно соотношению (3)) от изменения коэффициента пульсации *Kp* третьей гармоники тока на нагрузке *Kn*, при условии, что

$U_1 = 1\text{В}; I_{1Bm} = 1\text{А}; I_{1Cm}$ изменяется от 1,11,1 до 1,51 с шагом 0,1 А; $\varphi_{1C} = 30°$; $\varphi_{3C} = 0°$; $\varphi_{1B} = 30°$.

Для выделенной схемы на рис. 3 показаны зависимости $Q_{ОБ}^{(3)}/Q_{ОБ}^{(1)}$ и $Q_{ОБ}^{(\Sigma)}/Q_{ОБ}^{(1)}$ = при изменении угла Ф3 для *Kp*=0,25. Исходные данные при расчете: *U*=100; *I*=10.

Приведенные графики наглядно иллюстрируют процесс взаимокомпенсации обменных процессов на первой и третьей гармониках. Анализ графиков, представленных на рис. 2 и 3, показывает сложный характер влияния компенсатора *К* на величину искажений в функции коэффициента пульсаций *Кр*, а также возможность появления экстремумов в зависимости от соотношений амплитуды и фазы третьей гармоники тока компенсатора.



а

б

в

Рис. 3. Сложный характер влияния компенсатора КК на величину искажений в системе

Вывод. Расчетно-аналитический метод позволяет сделать вывод о сложности процессов, происходящих в энергосистеме. Сложность полученных характеристик позволяет увидеть влияние искажающих факторов на графики нагрузок. Из этого мы можем сделать вывод о необходимости установки компенсаторов, а именно гибридных фильтров, для коррекции существующих искажений.

Список литературы

1.Никитенко Я.А., Железняк А.А. Методы повышения достоверности контроля диагностических характеристик оборудования // Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли. Материалы молодежного научного форума студентов и аспирантов транспортных вузов с международным участием. М., 2019. С. 210-214.

2.Бордюг А.С. Идеология формирования типоразмеры рядов центробежных компрессоров судовой энергетической установки на базе автоматизированного проектирования // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2021. № 4. С. 126-138.

3.Шатровский Д.А. Перспективные энергетические установки большой мощности для морских судов // Судостроение. 2015. № 5. С. 33-35engines of ships // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. P. 816-824.

Неподоба Данил Витальевич, курсант, nepodobad@inbox.ru, Россия, Керч, Керченский государственный морской технологический университет,

Аблязимов Марлен Эдемович, курсант, nepodobad@inbox.ru, Россия, Керч, Керченский государственный морской технологический университет,

Бордюг Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, alexander.bordyug@mail.ru, Россия, Керч, Керченский государственный морской технологический университет

ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF COMPENSATORS IN POWER SUPPLY SYSTEMS WITH NONLINEAR NON-STATIONARY LOADS

D.V. Nepodoba, M.E. Ablyazimov, A.S. Bordyug

This article examines the types of power systems and shows the importance of the influence of distortions on their operation. Technical means are also considered, namely various compensators and their corrective effect on the present distortions in the system, united under the common name - FACTS (Flexible AC transmission systems). These systems allow you to adaptively adjust the main system parameters of AC transmission and achieve the best power transmission characteristics in real time. In other words, FACTS technologies increase the flexibility of power systems, making them more manageable and reliable. The basic idea of most FACTS systems is based on the well-known principles of longitudinal and transverse compensation of reactive parameters of electric power transmission. The use of fast-acting thyristor switches and microprocessor control systems made it possible to switch from slow and discrete operational control to smooth automatic regulation of reactive transmission parameters with sufficient control modes during the passage of transients in energy systems. The idea of using a serial compensator of the power transmission line of the CPC allows you to change the total resistance of the circuit and, consequently, influence the distribution of power over two communication lines. If you install a longitudinal compensator, which is essentially a smoothly and quickly adjustable CPC, it becomes possible to flexibly control the modes of communication between power systems by changing the resistance of such a compensator.

Key words: reliability, power supply, nonlinear load.

Unsuitable Danil Vitalievich, cadet, nepodobad@inbox.ru, Russia, Kerch, Kerch State Marine Technological University,

Ablyazimov Marlene Edemovich, cadet, nepodobad@inbox.ru, Russia, Kerch, Kerch State Marine Technological University,

Bordyug Alexander Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, alexander.bordyug@mail.ru, Russia, Kerch, Kerch State Marine Technological University

УДК 628.946
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-397-398

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ НАПРАВЛЕНИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА ПРОЖЕКТОРА ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

А.Н. Калякулин, М.В. Анахова, Е.А. Лысак

Рассмотрена конструкция прожектора электропоезда ЭД4М. Выявлены недостатки, в частности неспособность обеспечить машинисту необходимый обзор при вхождении поезда в кривые участки пути. Отмечено, что простая замена лампового прожектора светодиодным, установленным на современных электропоездах, экономически нецелесообразна, так как срок службы электропоезда ЭД4М закончится раньше срока службы матричного прожектора. Предложена система автоматической коррекции направления светового потока прожектора электропоезда ЭД4М, позволяющая значительно повысить безопасность и надежность при эксплуатации электроподвижного состава.

Ключевые слова: электропоезд ЭД4М, прожектор, световой поток, инклинометр, автоматическая система коррекции направления светового потока прожектора.

Очень часто вождение электропоездов и локомотивов машинистами проходит в условиях плохой видимости из-за дождя, снега или тумана. Для работы в условиях недостаточной видимости единицы электроподвижного состава оснащены приборами освещения. Надежность и эффективность прожекторов непосредственно влияют на безопасность эксплуатации электроподвижного состава, в частности электропоездов и локомотивов.

На лобовой стене головного вагона электропоезда ЭД4М, как показано на рис. 1, установлены прожектор, сигнальные буферные фонари и красные сигнальные огни.

Путь движения электропоезда ночью освещается прожектором (1), голова его обозначается двумя прозрачно – белыми сигнальными буферными фонарями (3). Хвост поезда обозначается двумя верхними (2) и одним нижним (4) красными сигнальными огнями [2, 3].

Прожектор (рис. 2.) расположен в верхней части лобовой стены и закрыт снаружи защитным стеклом *Е*. Регулировка направления луча прожектора в горизонтальной плоскости производится ослаблением болтов *Д*, поворотом прожектора вокруг оси *Г*, а в вертикальной плоскости – откидным винтом *В*. Для смены лампы прожектор необходимо повернуть на 90 - 110 ° вокруг оси *Г*, удалив болты *Д*. Патрон с установленной лампой повернуть так, чтобы плоскость, проходящая через нити накала лампы, была перпендикулярна поверхности отражателя. Максимальная сила света обеспечивается перемещением планки *А* и стойки *Б*. В качестве источника света в прожекторе использована лампа КГМ-110-600 – лампа накаливания кварцевая галогенная малогабаритная мощностью 600 *Вт* [2, 3].

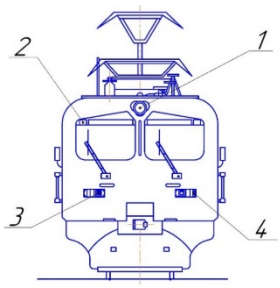


Рис. 1. Расположение осветительных и сигнальных приборов электропоезда ЭД4М

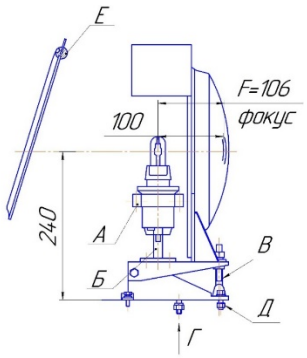


Рис. 2. Конструкция прожектора электропоезда ЭД4М

Для достижения необходимого уровня освещенности перед электроподвижным составом нормами безопасности железнодорожного транспорта нормируется осевая сила света прожектора. При этом нормируется значение двух режимов работы прожектора «ярко» и «тускло», последний режим включается при движении поездов навстречу друг другу на двухпутных и многопутных участках, а также при маневрировании на не приёмоотправочных путях.

Научные работы по совершенствованию конструкции прожектора электроподвижного состава, с целью получения хорошей светоотдачи, а также высокой степени надежности, проводятся постоянно [4-9]. Так как прожектор электропоезда с лампами типа КГМ имеет низкий КПД, разработчики современных прожекторов электроподвижного состава в качестве источников света используют либо газоразрядные ксеноновые лампы, либо светодиоды. Так на электропоездах «Сапсан» (ЭВС1) применяются прожекторы с ксеноновыми лампами, а на электропоездах «Ласточка» (ЭС2Г) и «Иволга» (ЭГ2Тв) установлены светодиодные прожекторы на основе дискретных светодиодов с коллиматорными линзами [7].

Та как общий недостаток ксеноновых и светодиодных прожекторов заключается в том, что для их установки в старые модели эксплуатируемых электропоездов и локомотивов требуется демонтаж прожектора старого образца и внесение изменений в цепь питания управления прожекторов, в работе [8] разработана светодиодная прожекторная лампа (СДПЖЛ), предназначенная для прямой замены прожекторных ламп накаливания типа ПЖ и КГМ, без внесения каких-либо изменений в прожекторное оборудование.

В рамках импортозамещения в работе [9] разработан прожектор 23М, не уступающий прожекторам немецкого производства, установленных на «Сапсане», но в 1,5-2 раза дешевле.

В данной статье поставлена задача устранения главного недостатка нынешней системы освещения – её неспособность обеспечить машинисту необходимый обзор при вхождении поезда в кривые участки пути (рис. 3). Луч светящего только прямо прожектора в этом случае не отклоняется от оси пути и выхватывает из темноты лишь участки обочины и придорожные кусты, при этом за поворотом может находиться неохраняемый переезд или какое-либо препятствие на рельсах. Данное обстоятельство непосредственным образом влияет на безопасность движения поездов и нередко является причиной аварийных ситуаций. Ежегодно на всей сети железных дорог Российской Федерации совершаются наезды на человека и столкновения с посторонними объектами, в том числе на кривых участках пути.

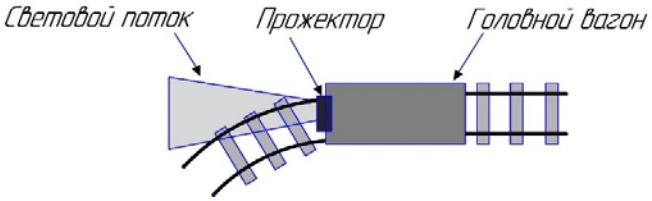


Рис. 3. Направление светового потока прожектора электропоезда при вхождении в кривую

Для повышения безопасности движения предлагается оснастить электропоезд ЭД4М системой автоматической коррекции направления светового потока прожектора в горизонтальной плоскости при проследовании кривых участков пути.

Известны работы, в которых разработан и описан способ коррекции угла отклонения светового потока прожектора локомотива в кривых участках пути. [10, 11]. В основе способа лежит использование светодиодного матричного прожектора с рефракторной оптикой, позволяющей эффективно изменять направленность светового

потока без применения подвижных элементов в конструкции. Следует отметить, что на современных электропоездах, например ЭС2Г «Ласточка» и ЭГ2Тв «Иволга», применяются матричные светодиодные прожекторы. Это дает возможность регулировать направление их светового потока по определенным законам, однако простая замена лампового прожектора светодиодным прожектором на электропоезде ЭД4М экономически не целесообразна, так как срок службы электропоезда закончится раньше срока службы матричного прожектора.

Система автоматической коррекции направления светового потока прожектора электропоезда ЭД4М, функциональная схема которой показана на рис. 4, состоит из: инклинометра, вычислительного блока, драйвера, редуктора, шагового электродвигателя двигателя и штатного прожектора электропоезда. Все элементы, входящие в состав системы, кроме инклинометра, размещены внутри кабины локомотива и не подвержены атмосферным влияниям. Электропитание производится от бортовой сети постоянным напряжением 12 *В* через понижающий преобразователь напряжения.

Рис. 4. Функциональная схема взаимодействия элементов автоматической системы коррекции направления светового потока прожектора

Данные об угле наклона поступают в вычислительный блок, который проводит анализ данных. В случае отклонения инклинометра относительно исходного положения вычислительный блок, согласно математическому алгоритму, рассчитывает угол отклонения оси светового потока прожектора в горизонтальной плоскости и передает сигнал управления на драйвер. Драйвер передает сигнал управления (определенное количество и продолжительность импульсов) на шаговый двигатель, являющийся исполнительным элементом.

Для решения задачи автоматической коррекции светового потока прожектора в данной статье предлагается способ на основе специальных датчиков инклинометров, благодаря которому система будет определять необходимый радиус поворота кривой и приближающийся электроподвижной состав. Известно, что в кривых участках пути для гашения поперечного ускорения применяется возвышение наружного рельса над внутренним. При прохождении кривой экипажная часть подвижного состава будет наклонена на некоторый угол «α», зависящий от величины возвышения наружного рельса. Положение экипажной части при прохождении кривой представлено на рисунке 5.

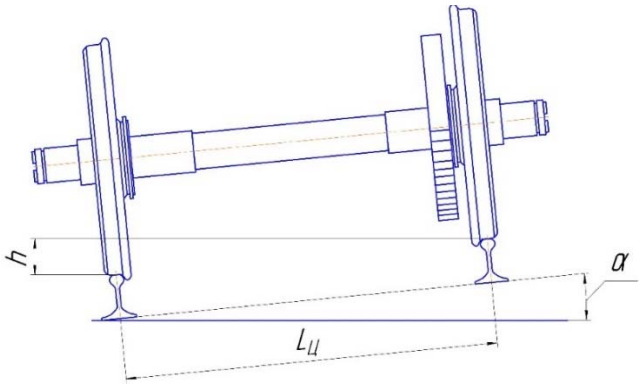


Рис. 5. Положение экипажной части при прохождении кривой: h – возвышение наружного рельса, мм; Lц – расстояние между центрами рельсов, мм; α – угол наклона экипажа, градусы

Можно сделать вывод, что радиус поворота кривой, и соответственно требуемый угол поворота прожектора, зависит от угла наклона экипажной части. Для измерения изменения угловых характеристик различных элементов конструкций транспортных и других подвижных средств относительно горизонтальной плоскости по двум ортогональным осям в промышленности используются специальные датчики – инклинометры. В качестве чувствительного элемента системы автоматической коррекции светового потока в рамках проекта предлагается использовать инклинометр. Цифровые инклинометры различаются по количеству осей измерения: одноосевые (ось X), двухосевые (оси X и Y) и трёхосевые (оси X, Y и Z). Так же инклинометры бывают статическими (для зданий и сооружений) и динамическими (для движущихся объектов).

Очевидно, что для решения нашей задачи требуется цифровой одноосевой динамический инклинометр. Указанным требованиям отвечает инклинометр ЛК-БД-ВГ500. Его внешний вид показан на рисунке 6.

Инклинометр ЛК-БД-ВГ500 имеет достаточно компактные габаритные размеры (рис. 7), что не создаст трудностей при его размещении на электропоезде. Инклинометр имеет моноблочное исполнение и состоит из чувствительного элемента с аналоговым выходом, предусилителя, аналого-цифрового преобразователя, микроконтроллера, приемопередатчиков интерфейса CAN, установленных в металлический корпус.

В качестве чувствительного элемента используется микромеханический двухосевой акселерометр. Аналоговый выход акселерометра, пропорциональный проекции ускорения свободного падения на ось чувствительности, преобразуется 24 битным аналого-цифровым преобразователем в цифровую форму и передается в микроконтроллер, который пересчитывает их в значения углов. Данный прибор оснащён высокоточным акселерометром и

гироскопом со встроенными алгоритмами нелинейной и перпендикулярной компенсации, а также температурной компенсации и компенсации дрейфа, это сводит к минимуму погрешность измерения и ложное срабатывание прибора.

Рис. 6. Цифровой одноосевой динамический инклинометр ЛК-БД-ВГ500

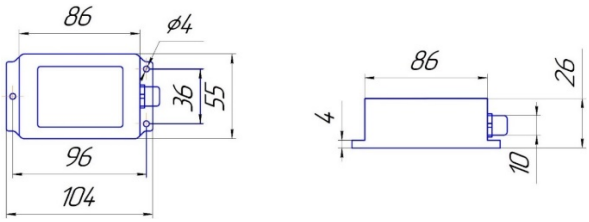


Рис. 7. Габаритные размеры инклинометра ЛК-БД-ВГ500

Направление поворота кривых определяется инклинометром по углу «α» или «– α». Значение угла наклона экипажа «α» (рис. 5) принято при возвышении наружного рельса с правой стороны по ходу движения (со стороны машиниста). Угол наклона экипажа «– α» принят при возвышении наружного рельса с левой стороны по ходу движения (со стороны помощника машиниста).

Наиболее целесообразно установить инклинометр на двух головных вагонах, так как они первыми по ходу движения будут входить в кривые. Головные вагоны на ЭД4М являются прицепными с расположением кабины управления. На тележке головного прицепного вагона в отличие от вагона моторного имеется поперечная балка, в средней части этой балки предлагается монтировать инклинометр. Для монтажа инклинометра на поперечных балках или по краям продольной балки потребовалось бы в два раза больше приборов и монтажных проводов. Также к плюсу установки инклинометра в данном месте относится его легкая доступность, что дает возможность выполнить работы на ремонтной канаве без подъема кузова. Расположение инклинометра на тележке головного вагона приведено на рисунках 8 и 9.

Рис. 8. Место установки инклинометра на поперечной балке тележки головного вагона электропоезда ЭД4М

Рис. 9. Расположение тележки и инклинометра на головном вагоне электропоезда ЭД4М

Шаговые двигатели непосредственно преобразуют управляющий сигнал в виде последовательности импульсов и фиксированный угол поворота вала. Благодаря этому и выбран шаговый двигатель. Поскольку в нише расположения прожектора место ограничено, выбран компактный шаговый двигатель серии FL57, а для увеличения крутящего момента этот небольшой двигатель оснащен встроенным редуктором. Внешний вид двигателя серии FL57 приведен на рисунке 10. Технические характеристики двигателя:

передаточное число – 3;
количество ступеней – 2;
полный шаг двигателя – 1,8 градуса;
средний ресурс работы – 20000 часов;
масса – 0,45 кг.

Плавность хода и точность шага двигателя обеспечивается специальным устройством – драйвером шагового двигателя. Производителем рекомендовано использовать с двигателем серии FL57 драйвер SMD-1.6DIN.

Прожектор электропоезда присоединен осью к редуктору, установленному заодно с валом шагового двигателя, при помощи муфты.

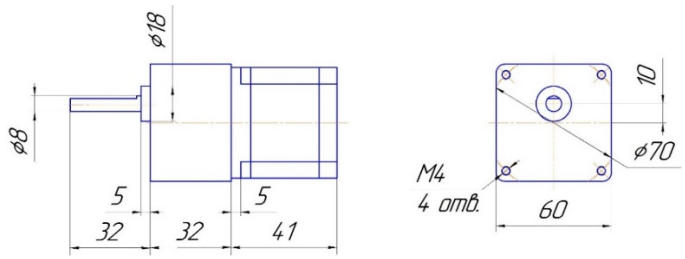


Рис. 10. Компактный шаговый двигатель серии FL57 (совмещенный с редуктором): 1 – двигатель, 2 – редуктор

Управление шаговым двигателем осуществляется драйвером и вычислительным блоком. Инклинометр, установленный на горизонтальной поверхности экипажной части головного вагона и являющийся чувствительным элементом, определяет угол наклона экипажа при вхождении и прохождении кривой участка пути.

Шаговый двигатель осуществляет поворот прожектора в горизонтальной области на необходимый угол (рис. 11).

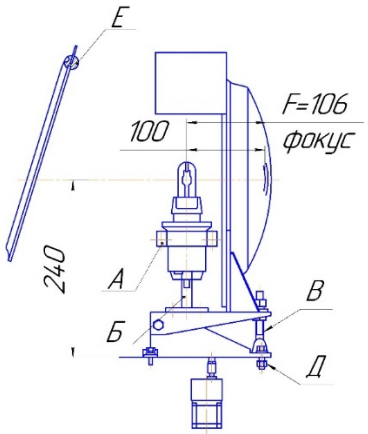


Рис. 11. Общий вид прожектора с шаговым двигателем

Направление светового потока приведено на рисунке 12. В случае выхода из строя вычислительного блока или программного обеспечения прожектор автоматически переводится и блокируется в центральном положении. Также предусмотрено аварийное ручное управление передаточным механизмом в случае неисправности шагового двигателя. Аварийное ручное управление осуществляется из кабины машиниста.

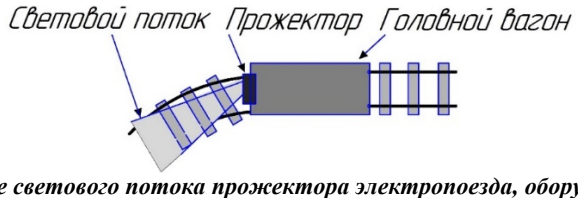


Рис. 12. Направление светового потока прожектора электропоезда, оборудованного системой автоматической коррекции светового потока, при вхождении в кривую

Таким образом, все элементы, входящие в состав системы, кроме инклинометра, размещены внутри кабины локомотива и не подвержены атмосферным влияниям. Электропитание производится от бортовой сети постоянным напряжением 12 *В* через понижающий преобразователь напряжения. Данный лобовой прожектор обладает более высокой светоотдачей и повышенной степенью надежности.

Список литературы

1. Анахова М.В. Стратегия обеспечения эксплуатационной надежности и технологической устойчивости локомотивов / М.В. Анахова, Д. Я. Носырев // Вестник Самарской государственной академии путей сообщения. 2007. № 8. С. 40-42.

2. Электропоезд ЭД4М модели 62-301. Руководство по эксплуатации. – 301.00.00.001 / ООО «Демиховский машиностроительный завод». 2005. 301 с.

3. Шубный Д.С. Особенности конструкции электропоездов постоянного тока серии ЭД4, ЭД4М, ЭД4МК, ЭД4МКу, ЭД4МКМ, ЭД4МКМ-АЭРО // Академия педагогических идей Новация. 2019. № 5. С. 70-73.

4. Харитонов И.В. Светодиодные головные прожекторы локомотивов / И. В. Харитонов, Б. С. Сергеев // Железнодорожный транспорт. 2015. № 12. С. 59-60.

5. Патент на полезную модель № 216791 U1 Российская Федерация, МПК F21S 10/00. «ЛСПП» Локомотивный светодиодный поворотный прожектор: № 2022117433: заявл. 28.06.2022: опубл. 01.03.2023 / А. А. Белоцкий; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «НПО Квант».

6. Патент № 2706334 C1 Российская Федерация, МПК F21V 8/00. Способ формирования кривой силы света прожектора, прожектор и светодиодное осветительное устройство прожектора для реализации способа: № 2017138569: заявл. 07.11.2017: опубл. 18.11.2019 / Ю. В. Ивлиев.

7. Оценка эффективности прожекторов и прожекторных ламп, применяемых на железнодорожном транспорте / А. А. Ашрятов, С. А. Вишневский, Р. Р. Волков, А. В. Казаков // Энергобезопасность и энергосбережение. 2018. № 4. С. 21-26.

8. Патент на промышленный образец № 121003 Российская Федерация. Лампа прожекторная светодиодная: № 2020500944: заявл. 03.03.2020: опубл. 11.08.2020 / С. А. Вишневский, Р. Р. Волков; заявитель ОАО «Электронные компоненты и источники света».

9. Давыдов М.Ю. Новый прожектор для тягового подвижного состава // Локомотив. 2016. № 12(720). С. 23-27.

10. Фролов Н.О. Новый способ управления осью светового пучка прожектора локомотива в кривых участках пути / Н. О. Фролов, Е. М. Елькин // Транспорт Урала. 2020. № 4(67). С. 68-74.

11. Патент № 2764399 C1 Российская Федерация, МПК F21S 41/65, B60Q 1/02, B61D 29/00. способ коррекции направления светового потока прожектора подвижного состава при движении в кривых участках пути и система для осуществления этого способа: № 2021109528: заявл. 06.04.2021: опубл. 17.01.2022 / Н. О. Фролов, Е. М. Елькин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения».

Калякулин Алексей Николаевич, канд. техн. наук., доцент, alexeiruz@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный университет путей сообщения,

Анахова Марина Вениаминовна, канд. техн. наук, доцент, amv-63@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный университет путей сообщения,

Лысак Елена Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, elena_lysak@list.ru, Россия, Самара, Самарский государственный университет путей сообщения

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC CORRECTION OF THE DIRECTION OF THE ELECTRIC TRAIN SPOTLIGHT

A.N. Kalyakulin, M.V. Anakhova, E.A. Lysak

The design of the ED4M electric train searchlight is considered. Shortcomings were revealed, in particular, the inability to provide the driver with the necessary overview when the train enters the curved sections of the track. It is noted that a simple replacement of a lamp searchlight with an LED one installed on modern electric trains is economically impractical, since the service life of the ED4M electric train will end before the service life of the matrix searchlight. A system of automatic correction of the direction of the light flux of the ED4M electric train spotlight is proposed, which significantly improves safety and reliability during operation of the electric rolling stock.

Key words: electric train ED4M, searchlight, luminous flux, inclinometer, automatic system of correction of the direction of the luminous flux of the searchlight.

Kalyakulin Alexey Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, alexeiruz@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State University of Railway Transport,

Anakhova Marina Veniaminovna, candidate of technical sciences, docent, amv-63@mail.ru, Russia. Samara, Samara State University of Railway Transport,

Lysak Elena Anatolyevna, candidate of technical sciences, docent, elena_lysak@list.ru, Russia. Samara, Samara State University of Railway Transport

УДК 621.311
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-403-404

АНАЛИЗ РЕЖИМА КАЧАНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕРАВЕНСТВА ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ ГЕНЕРАТОРОВ

И.М. Слабженникова, Е.П. Матафонова

В работе описано теоретическое исследование режима качаний в условиях неравенства электродвижущих сил генераторов. Выведены формулы для определения разности электродвижущих сил генераторов для общего и трех частных случаев. Выполнены вычисления для трех состояний электрической системы. Проведен анализ скорости изменения разности электродвижущих сил генераторов от отношения их модулей.

Ключевые слова: режим качаний, асинхронный ход, разность электродвижущих сил генераторов.

При нарушении синхронной работы генераторов возникают явления, называемые качаниями. При таком режиме работы электрические величины периодически изменяются и могут достигать значительных значений, превышающих нормальную величину.

В работе [1] показано, что это может привести к ложным срабатываниям защит в различных точках энергосистемы, утяжелению аварийной обстановки и развитию асинхронизма.

В сложной системе могут быть случаи, когда асинхронный ход, возникший в одной части системы, может привести к выпадению из синхронизма какого-либо генератора или группы генераторов в другой части энергосистемы [2]. Как отмечают авторы работы [3], качания, возникающие при аварийных ситуациях в различных точках энергосистемы, являются очень опасным ненормальным режимом работы, так как могут привести к дальнейшему развитию аварии вплоть до развала энергосистемы.

Для исследования режима качаний рассмотрим базовую модель электрической системы, состоящую из двух генераторов (рис. 1), связанных между собой линией электропередачи. Для такой системы ток качания определяется по формуле [4]

$$\dot{I}_{кач} = \frac{\Delta\dot{E}}{z_{12}},$$

где $\Delta\dot{E}$ - разность электродвижущих сил (ЭДС) генераторов, В; z_{12} - эквивалентное сопротивлением цепи, по которой замыкается ток качания, Ом.

В работе [4] предлагается формула для определения разности ЭДС генераторов при условии, что $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2| = \dot{E}$

$$\Delta E = 2E\sin\frac{\delta}{2},$$

где δ - угол между векторами $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$, град.

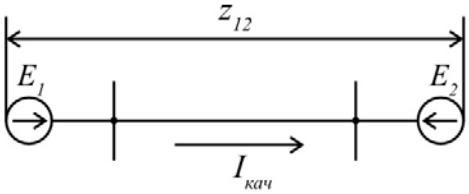


Рис. 1. Модель электрической системы

В результате, когда ЭДС генераторов противоположны по фазе, ток качания достигает максимального значения. Когда совпадают по фазе, ток качания уменьшается до нуля.

Однако для реальных энергосистем, как показано в работах [4, 5], $|\dot{E}_1| \neq |\dot{E}_2|$. В результате при δ = 0^0 ток качания не равняется нулю, что необходимо рассматривать при исследовании режима качаний.

Перейдем к выводу общей формулы для вычисления модуля $\Delta\dot{E}$. Для этого построим векторную диаграмму двух ЭДС при качаниях (рис. 2).

В представлении этой векторной диаграммы квадрат модуля $\Delta\dot{E}$ определяется по формуле (1)

$$\Delta E^2 = (\dot{E}_2 - \dot{E}_1)(\dot{E}_2 - \dot{E}_1) = E_2^2 - 2E_1E_2\cos\delta + E_1^2. \quad (1)$$

Из (1) следует, что

$$\Delta E = \sqrt{E_2^2 - 2E_1E_2\cos\delta + E_1^2}. \quad (2)$$

Из формулы (2) получим общую формулу для вычисления разности ЭДС генераторов

$$\Delta E = E_1\sqrt{\frac{E_2}{E_1}\left(\frac{E_2}{E_1} - 2\cos\delta\right) + 1}. \quad (3)$$

Для упрощения анализа ΔE введем переменную k_{21} в виде

$$k_{21} = \frac{E_2}{E_1}.$$

На рис. 3 изображены графики зависимости ΔE от угла δ, построенные по формуле (3), для ряда фиксированных значений k_{21} при E_1 = 1 усл. ед. Из данного рисунка следует, что с увеличением k_{21} значение ΔE становится больше, что приводит к росту тока качания.

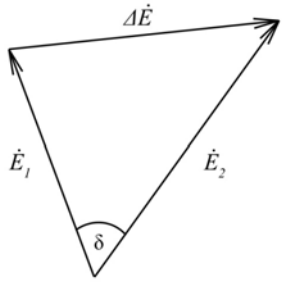


Рис. 2. Векторная диаграмма двух ЭДС при качаниях

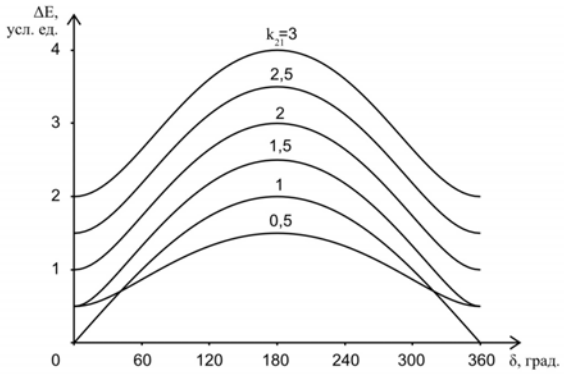


Рис. 3. Графики зависимости ΔE от угла δ для ряда фиксированных значений k21

Рассмотрим три состояния электрической системы, когда угол между векторами $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ равен 0^0, 90^0 и 180^0, при условии, что $|\dot{E}_1| \neq |\dot{E}_2|$.

В первом состоянии электрической системы при δ = 0^0 формула (3) примет вид

$$\Delta E = E_1\sqrt{k_{21}(k_{21}-2)+1} = E_1(k_{21}-1). \quad (4)$$

Для второго состояния электрической системы при δ = 90^0 формула (3) преобразуется к виду

$$\Delta E = E_1\sqrt{k_{21}^2+1}. \quad (5)$$

В третьем состоянии электрической системы при δ = 180^0 после вычисления квадратного корня формула (3) примет вид

$$\Delta E = E_1(k_{21}+1). \quad (6)$$

На рис. 4 показаны графики зависимости $\Delta E = f(k_{21})$, построенные по формулам (4) - (6) для трех состояний электрической системы.

Зависимость 1 на рис.4 соответствует состоянию системы при δ = 0^0. Видно, что при $|\dot{E}_1| = |\dot{E}_2|$ разность ЭДС генераторов равна нулю, следовательно, ток качания также будет равен нулю. При увеличении отношения $k_{21} = E_2/E_1$ значение Δ*E* линейно возрастает, что приводит к росту тока качания. Аналогичная линейная зависимость наблюдается для состояния при δ = 180^0 (рис. 4, график 3), однако, значения Δ*E* больше и график находится выше. Скорость изменения величины Δ*E* для обеих зависимостей одинакова и является постоянной величиной.

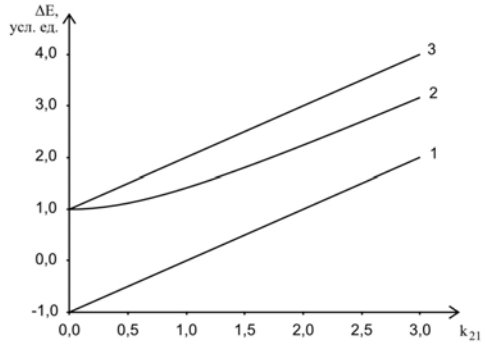


Рис. 4. Графики зависимости ΔE от величины k21 для трех состояний электрической системы: 1 - δ = 0^0; 2 - δ = 90^0; 3 - δ = 180^0

Зависимость 2 на рис. 4 нелинейная, скорость изменения величины Δ*E* зависит от отношения $k_{21} = E_2/E_1$. При $0 \le k_{21} \le 1$ скорость увеличения Δ*E* меньше, чем для зависимостей 1 и 3. Однако при $k_{21} > 1$ скорость изменения Δ*E* выравнивается до значения 1-й и 3-й зависимостей. Для анализа изменения Δ*E* вычислены первая и вторая производные Δ*E* от k_{21}

$$(\Delta E)' = E_1 k_{21} \Big/ \sqrt{k_{21}^2 + 1}\,, \tag{7}$$

$$(\Delta E)'' = E_1 \left[\left(k_{21}^2 + 1\right)^{-\frac{1}{2}} - k_{21}^2 \left(k_{21}^2 + 1\right)^{-\frac{3}{2}} \right]. \tag{8}$$

Графики, построенные по формулам (7), (8), представлены на рис. 5. Из рис. 5 (кривая 1) следует, что в диапазоне $0 \le k_{21} \le 1$ скорость увеличения величины Δ*E* высокая. При $k_{21} > 1$ скорость изменения Δ*E* увеличивается медленнее и стремится к предельному значению. А вторая производная Δ*E* от k_{21} стремится к нулю в данном диапазоне (рис. 5, кривая 2).

Данное исследование проведено для угла δ = 90^0. Как следует из графиков (рис. 4) для других значений угла в диапазоне $0^0 < \delta < 180^0$ зависимость скорости изменения величины Δ*E* от k_{21} аналогична.

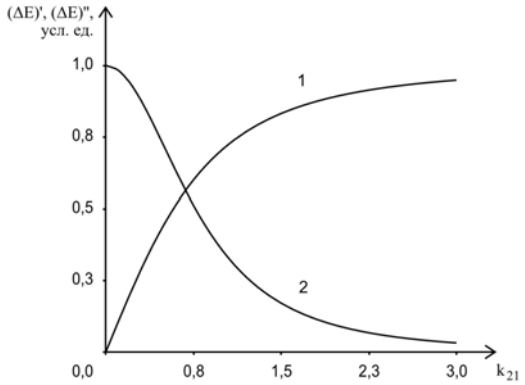


Рис. 5. Графики зависимости первой и второй производной Δ*E* от величины k_{21}: 1 - первая производная (Δ*E*)'; 2 - вторая производная (Δ*E*)"

Таким образом, в работе теоретически показано, что отношение E_2/E_1 влияет на разность ЭДС генераторов, а это задает значение тока качания. В результате, для предотвращения ложного срабатывания релейной защиты, ток срабатывания защиты должен выбираться больше максимального значения тока качания при δ = 180^0 с учетом отношения E_2/E_1.

Список литературы

1. Назаренко Е.А., Винаковская Н.Г. Анализ блокировок дистанционной защиты от синхронных качаний и асинхронного режима // Сб. избранных статей междунар. науч. конф. «Высокие технологии и инновации в науке»: 27 ноября 2020. Санкт-Петербург: Изд-во ГНИИ Нацразвитие, 2020. С. 169 - 172.

2. Гришанов С.А. Обоснование необходимой математической модели генератора для анализа асинхронных режимов // Сб. тр. 2-й междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные перспективы Донбасса»: 25 - 26 мая 2016. Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2016. Т. 2. С. 40 - 47.

3. Мамакеева А.К. Расчет и анализ генераторов ЭЭС при отсутствии аварийного резерва мощности // Сб. тр. восьмой междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика: Управление, качество и эффективность использования энергоресурсов»: 27 - 29 мая 2015 / под ред. Н.В. Савиной. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2015. С. 183 - 186.

4. Чернобровов Н.В. Релейная защита. М.: Энергия, 1974. 680 с.

5. Наровлянский В.Г. Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы. М.: Энергоатомиздат, 2004. 360 с.

Слабженникова Ирина Михайловна, канд. физ.-мат. наук, доцент, slabzhennikova.im@dgtru.ru, Россия, Владивосток, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,

Матафонова Елена Петровна, канд. техн. наук, доцент, matafonova.ep@dgtru.ru, Россия, Владивосток, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

ANALYSIS OF THE ROCKING MODE UNDER CONDITIONS OF INEQUALITY OF THE ELECTRIC DRIVE FORCES OF GENERATORS

I.M. Slabzhennikova, E.P. Matafonova

The paper describes a theoretical study of the oscillation mode under conditions of non-equality of the electromotive forces of generators. Formulas are derived for determining the difference in the electromotive forces of generators for

the general and three special cases. Calculations are made for three states of the electrical system. The analysis of the rate of change of the difference of electromotive forces of generators from the ratio of their modules is carried out.

Key words: oscillation mode, asynchronous running, difference in electromotive forces of generators.

Slabzhennikova Irina Mikhailovna, candidate of physical and mathematical sciences, docent, slabzhennikova.im@dgtru.ru, Russia, Vladivostok, Far Eastern State Technical Fisheries University,

Matafonova Elena Petrovna, candidate of technical sciences, docent, matafonova.ep@dgtru.ru, Russia, Vladivostok, Far Eastern State Technical Fisheries University

УДК 621.31
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-406-407

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЦИИ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА В ЦЕПИ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МОМЕНТОМ

А.В. Вынгра

Электроприводы с изменяющимся моментом, согласно государственным стандартам, являются одним из источников эмиссии гармоник в электрическую сеть. Такими электроприводами являются, в частности, электроприводы поршневых компрессоров. В работе рассматривается проведение экспериментального исследования интеграции активного фильтра в цепи питания таких электроприводов. Произведен теоретических анализ проблематики исследования, рассмотрены положительные и отрицательные стороны применения активных фильтров для повышения качества электроэнергии, определены пути развития данной отрасли. На спроектированном лабораторном стенде произведены измерения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока и напряжения для случаев работы электропривода без активного фильтра и с активным фильтром. Также произведены вычисления спектра тока, выделены интергармоники. Спектральный анализ показал, что разность кривой измеренного тока и основной гармоники состоит из интергармонических составляющих (гармоник, некратных частоте сети). Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока составил 12%, и снизился при работе активного фильтра до 3,5%. Экспериментальное исследование применения активного фильтра по возмущению на примере электропривода поршневого компрессора показало так же снижение амплитуд интергармонических составляющих тока в два реза.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, интергармоники, качество электроэнергии, активный фильтр.

Нелинейные характеристики многих промышленных и коммерческих нагрузок, таких как силовые тиристорные преобразователи, люминесцентные лампы, компьютеры, диммеры, электроприводы с изменяющимся моментом и частотные преобразователи, сделали гармонические искажения обычным явлением в электрических сетях.

В работах современных авторов было предложено несколько решений для повышения качества электроэнергии, начиная с пассивных фильтров (ПФ) и заканчивая активными фильтрами (АФ) и фильтрокомпенсирующими устройствами. Например, в работе [1], автор обсудил как их потенциал, так и проблемы развития. В отличие от ПФ, современные активные фильтры (АФ) имеют следующие многочисленные функции: фильтрация гармоник, демпфирование, изоляция и согласование, управление реактивной мощностью для коррекции коэффициента мощности и регулирования напряжения, балансировка нагрузки, уменьшение фликера напряжения и/или их комбинации. В работе [2], автор рассматривает АФ для регулирования мощности, показывая, что их можно разделить в зависимости от конфигурации и подключения на три основные категории: параллельные, последовательные и гибридные активные фильтры

Активные фильтры в настоящее время получили уже немалое развитие, однако в большинстве случаев их принцип заключается в паразитном потреблении тока при искажении напряжения и рассчитан на улучшение качества напряжения для конкретного устройства, а не энергетической системы в целом.

Одним из основных минусов работы активных фильтров в настоящее время является время реакции на отклонение, связанное с временем, затрачиваемым на измерение и обработку данных. В предложенном автором устройстве этот минус решаем за счет работы по возмущению эталонного сигнала, а не по отклонению [3].

Для произведения экспериментального исследования интеграции активного фильтра в цепи питания электропривода с изменяющимся моментом собран лабораторный стенд, включающий в себя следующее оборудование [4]:

1. Поршневой холодильный судовой компрессор, Bitzer 4TCS–8.2Y;
2. Электропривод 10,3 кВт;
3. Пассивный фильтр DL-25EB3, 25A;
4. Измерительные приборы:
   a. Анализатор качества электроэнергии Janitza UMG 104;
   b. Осциллограф АКИП;
   c. Трансформатор тока 50/5A;
   d. Аналогово-цифровой датчик тока на основе эффекта Холла.

Основным измерительным устройством качества электрической энергии выступал анализатор качества электроэнергии Janitza UMG 104.

Снятие характеристик тока, напряжения, гармонического искажения тока и напряжения электродвигателя. На разработанном стенде производилось измерение электрических характеристик электропривода поршневого компрессора для случаев работы без активного фильтра и с активной фильтрацией тока. Результаты измерений суммарного коэффициента гармонических составляющих (СКГС) тока и напряжения электропривода представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений

Параметр	Сеть	Холостой ход	С пассивным фильтром	С активным фильтром
СКГС тока	–	0,1%	12	3,5%
СКГС напряжения	2%	2%	7,5%	4%

Осциллограммы напряжения на клеммах электродвигателя экспериментальной установки приведены на рисунке 1. Из полученных экспериментальных данных видно, что кривая напряжения неизменна при работе установки с фильтром и без него [5-7].

Осциллограммы тока фазы А (в о.е. от номинального тока статора) при работе компрессора без активного фильтра приведены на рисунке 2., где отчётливо видно, что у различных периодов проявляется биение синусоиды тока и сами периоды отличаются временем. СКГС тока составил 12%.

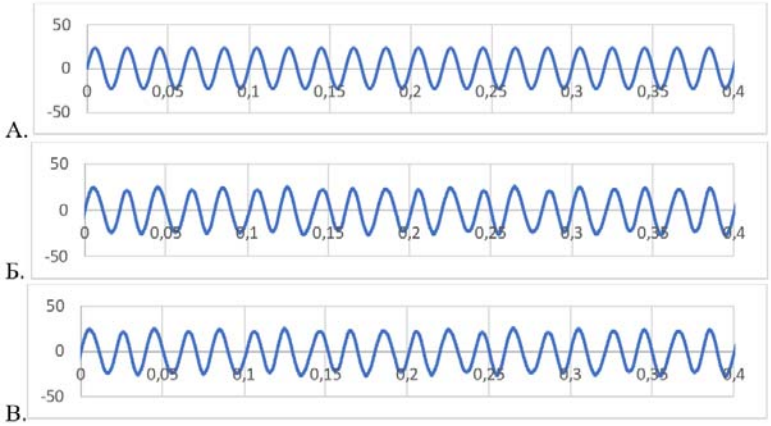


Рис. 1. Токи фазы А: холостой ход (А), без пассивного фильтра (Б) напрямую с пассивным фильтром (В)

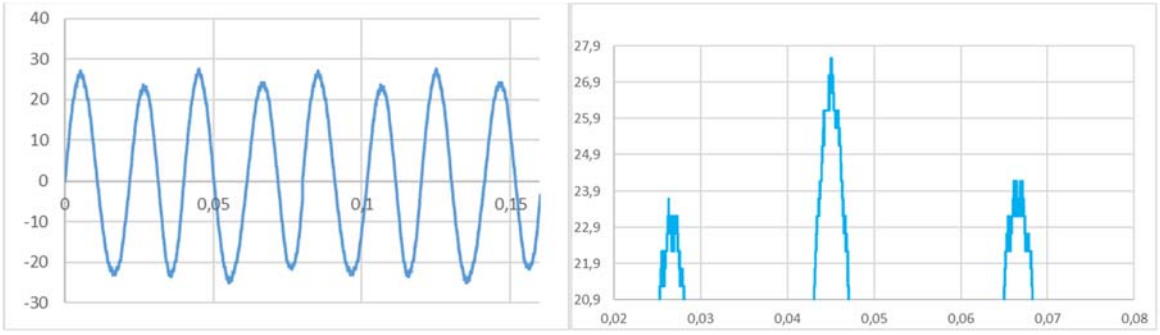


Рис. 2. Осциллограмма тока фазы А

Осциллограммы и спектр показывают, что разница результатов, полученных при моделировании и на экспериментальной установке несущественная, и составляет не более 10% для спектра тока. Интергармоническими составляющими (ИГС) тока с наибольшей амплитудой при моделировании являлись гармоники с частотой 21 и 77 Гц, а при эксперименте - 27 и 72 Гц. Амплитуды соответствующих гармоник составили относительно амплитуды первой гармоники 4% и 7% при моделировании и 12% и 10 % в процессе эксперимента [8].

Отклонения обусловлены допущениями, принятыми в ходе составления модели, а также погрешностью измерительных приборов. Так же, в работе [9] на основе анализа данных испытаний работающего трехфазного асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт с механической нагрузкой воздушного компрессора установлено, что при работе двигателя воздушного компрессора генерируются интергармоники напряжения и тока частотой 37,5 и 62,5 Гц.

Так как активный фильтр спроектирован для подавления искажения кривой тока, подробнее рассматривается вопрос выделения интергармонического искажения тока статора электродвигателя.

Исследование гармонического состава тока электродвигателя. Для дальнейшего исследования выделена основная гармоника напряжения и получена разница с фактическим значением тока. На рисунке 3 представлено наложение основной гармоники и фактического значения тока.

Разница между фактическим током и его первой гармоникой представлена на рисунке 5.

Искажение тока имеет некоторую повторяемость и периодическую форму, для которой производится спектральный анализ (рисунок 4).

На рисунке 4 отчетливо видно, что форма пульсации тока в фазе электропривода по форме и частоте схожи с формой периодической нагрузки на валу электропривода при нагрузке.

Спектральный анализ показал, что разность токов состоит из интергармоник некратной частот. СКГС тока составил 12%.

В ходе исследования была разработана программа для ПК [10], позволяющая производить анализ гармонического и интергармонического состава сигнала с осциллографа в матричном виде.

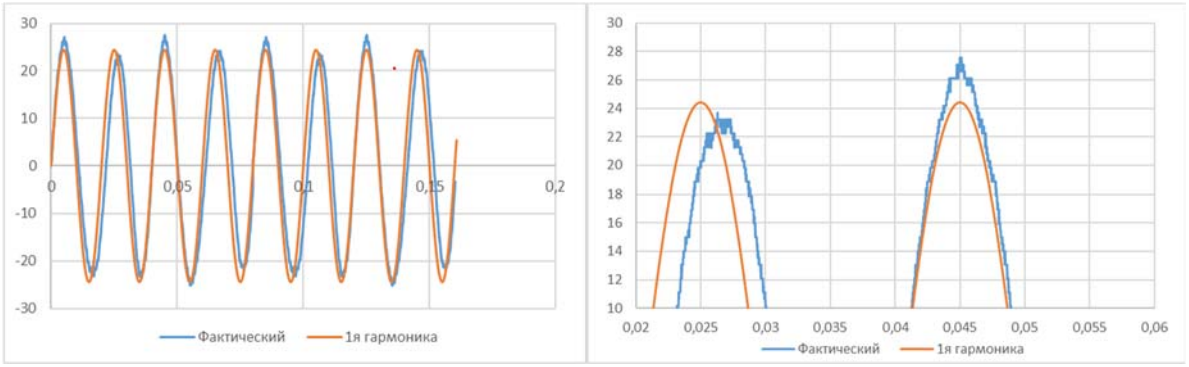


Рис. 3. Наложение основной гармоники тока на фактическое значение тока

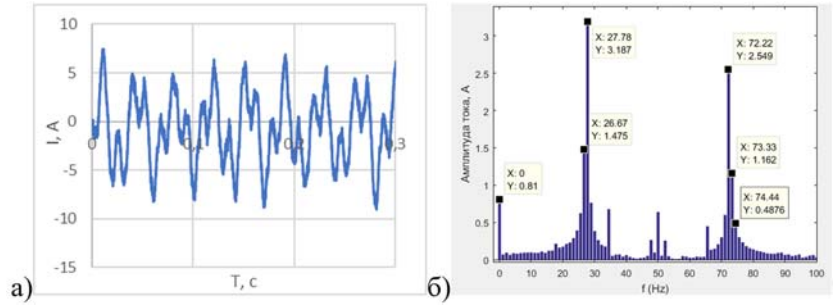


Рис. 4. Разница основной гармоники тока и фактического значения тока (а) и ее спектр (б)

Испытания с применением разработанного активного фильтра. В результате эксперимента были получены осциллограммы и спектры тока при работе компрессора без активного фильтра и с фильтрацией.

На рисунке 5 видно, что при включении в цепь питания электропривода поршневого компрессора амплитуды интергармоник уменьшаются на 50% при том, что основная гармоника тока не изменяет своей амплитуды. СКГС тока без активного фильтра составляет 12%, при включении в цепь активного фильтра уменьшается до 3,5%.

В реальном устройстве не происходит полного подавления интергармонического искажения из-за ряда допущений и округлений при работе измерительной аппаратуры и вычисления спектра.

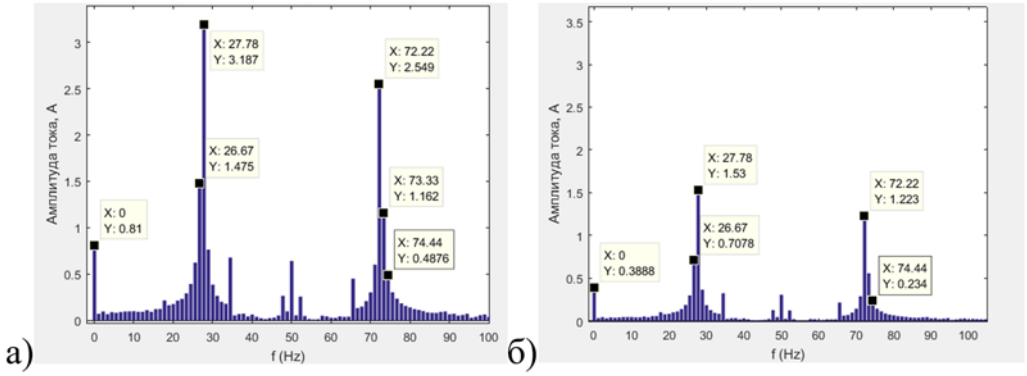


Рис. 5. Спектр искажения тока без активного фильтра (а) и с фильтром (б)

Эксперимент показал, что спроектированное устройство способно генерировать периодический трехфазный симметричный и несимметричный токи различного гармонического спектра и компенсировать ими ИГС тока нагрузки электропривода поршневого компрессора. В лабораторных условиях устройство позволило снизить амплитуды интергармонических составляющих тока электропривода воздушного компрессора на 50%, тем самым понизив СКГС тока на 8,5%.

Таким образом, предложенные методы и рекомендации по обеспечению качества электроэнергии путем компенсации интергармонических составляющих активным фильтром по возмущению могут быть применены как в системах с ЭП поршневых компрессоров как малой, так и большой мощности [11].

Заключение. Экспериментальное исследование применения активного фильтра по возмущению на примере электропривода поршневого компрессора показало снижение СКГС с 12% до 3,5% и интергармонических искажений тока на 50%. Показано, что применение алгоритмов работы активного фильтра по возмущению позволяет увеличить производительность активного фильтра и улучшить процесс подавления интергармонического искажения тока сети при работе электроприводов с изменяющимся моментом.

Список литературы

1. Passive filters – potentialities and limitations. / JC. Das S. Member // IEEE Trans Ind Appl. 2004. 4(1). P. 232–241.

2. Akagi H. Active harmonic filters. Proc IEEE. 2005. 93(12). P. 2128–2141.

3. Мещеряков В.Н. Активный фильтр электроэнергии с общим звеном постоянного тока и системой управления на основе релейного регулятора тока / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №7. С. 26-33.

4. Мещеряков В.Н. Компенсация гармонических искажений и реактивной мощности в однофазных электрических сетях посредством параллельного активного фильтра электроэнергии на базе релейного регулятора тока / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. Новочеркасск. 2013. №4. С. 54-57.

5. Михайлов В.В. Математическое моделирование параллельного компенсатора мощности / В. В. Михайлов, М. В. Позднов // Технические науки в России и за рубежом : материалы II Междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2012 г.). М.: Буки-Веди, 2012. С. 69-74.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611158 Российская Федерация. Формирование управляющего сигнала силового активного фильтра для компенсации интергармонических составляющих тока: № 2022686734: заявл. 28.12.2022: опубл. 17.01.2023 / А. В. Вынгра; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет».

7. Авдеев Б.А. Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2021. № 4. С. 99-113. DOI 10.47404/2619-0605_2021_4_99.

8. Авдеев Б.А. Комплексные решения интеграции постоянного и переменного токов в адаптивных интеллектуальных распределительных сетях с помощью твердотельного трансформатора / Б. А. Авдеев // Энергобезопасность и энергосбережение. 2022. № 3. С. 15-20. DOI 10.18635/2071-2219-2022-3-15-20.

9. Zhiyuan M. Interharmonics analysis of a 7.5 kW air compressor motor / M. Zhiyuan, M. Xiong, L. Le, X. Zhong // Open Access Proceedings Journal. 2017. P. 738-741. DOI:10.1049/oap-cired.2017.1132.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616882 Российская Федерация. InterHarmonics Analyzer: № 2020615843 : заявл. 08.06.2020: опубл. 25.06.2020 / А. В. Вынгра, Б. А. Авдеев, Бюл. № 7. 2.76 Мб.

11. Кучерюкова М.В. Повышение энергоэффективности технологических процессов применением электронных средств управления качеством электроэнергии // Образование, наука и молодежь - 2022 : Сборник трудов по материалам Научно-практической конференции студентов и курсантов. Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. С. 27-30.

Вынгра Алексей Викторович, старший преподаватель, elag1995@gmail.com, Россия, Керчь, Керченский государственный морской технологический университет

STUDY OF THE INTEGRATION OF AN ACTIVE FILTER IN THE POWER CIRCUIT OF AN ELECTRIC DRIVE WITH VARIABLE TORQUE

A.V. Vyngra

Electric drives with variable torque, according to GOST, are one of the sources of harmonic emissions into the electrical network. Such electric drives are, in particular, electric drives of piston compressors. The paper discusses an experimental study of the integration of an active filter in the power circuit of such electric drives. A theoretical analysis of the research problems was carried out, the positive and negative aspects of using active filters to improve the quality of electricity were considered, and ways of development of this industry were determined. On a designed laboratory bench, measurements of the total harmonic coefficient of current and voltage were carried out for cases of electric drive operation without an active filter and with an active filter. The current spectrum was also calculated and interharmonics were identified. Spectral analysis showed that the difference between the measured current curve and the fundamental harmonic consists of interharmonic components (harmonics that are not a multiple of the network frequency). The total coefficient of harmonic components of the current was 12%, and decreased when the active filter was operating to 3.5%. An experimental study of the use of an active disturbance filter using the example of an electric drive of a piston compressor also showed a decrease in the amplitudes of the interharmonic components of the current by two cuts.

Key words: asynchronous motor, experiment, power quality, active filter.

Vyngra Aleksei Viktorovich, lecturer, elag1995@gmail.com, Russia, Kerch, Kerch State Marine Technological University

УДК 621.31
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-410-411

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАБОТЫ КЛИМАТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ЗАПАС ХОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

К.М. Сидоров, В.Н. Козловский, Д.И. Панюков

В статье представлены результаты исследования влияния работы климатической установки на запас хода электромобиля.

Ключевые слова: электромобиль, запас хода, климатическая установка.

Задача отопления и кондиционирования воздуха салона автомобиля традиционной конструкции не вызывает особых сложностей, поскольку двигатель внутреннего сгорания (ДВС) является одновременно и источником механической энергии для привода навесного вспомогательного оборудования, и источником тепла, которое может быть полезным образом утилизировано (направлено) на обогрев салона [1, 2]. Однако силовая установка транспортного средства (ТС), в котором ДВС отсутствует или является вспомогательным звеном, функционирующим ограниченное по продолжительности время, определяет следующие проблемы, которые препятствуют созданию комфортных условий в салоне традиционным способом:

- отсутствие мощного постоянного источника тепловой энергии на борту транспортного средства;
- отсутствие источника механической энергии, который обеспечил бы непрерывный отбор мощности для привода вспомогательных механических устройств – жидкостных насосов и компрессора кондиционера.

С целью решения проблем создания должного микроклимата в салоне транспортного средства, где основным источником энергии для движения является тяговая аккумуляторная батарея [3, 4], целесообразно применение электрического компрессорного агрегата в составе климатической установки. Конструкция такого устройства содержит в составе единого блока:

- компрессор (нагнетатель), по своей конструкции аналогичный обычному варианту для автомобиля;
- бесконтактный электродвигатель переменного тока, осуществляющий механический привод компрессора;
- инвертор с блоком управления электродвигателем компрессора.

Преимуществом компрессора с электрическим приводом является более высокий КПД в сравнении с традиционным вариантом, отсутствие электромагнитной муфты и его автономность.

Другой системой, наличие которой в составе климатической установки продиктовано скорее крайней необходимостью, чем требованиями повышения энергетической эффективности силовой установки, является система электрического отопления салона [5]. По условию снижения токовых нагрузок основной элемент указанной системы – теплоэлектрический нагреватель, должен, наравне с компрессорным агрегатом, быть рассчитан на работу при высоком напряжении. Только в этом случае можно гарантировать продолжительную и эффективную работу системы отопления транспортного средства с необходимой теплопроизводительностью [6].

Составной частью энергоэффективной системы электрического отопления салона перспективных транспортных средств являются, как правило, нагревательные элементы с положительным температурным коэффициентом (ПТК) - позисторы. Отличительной чертой нагревательных элементов на основе позисторов является самоограничение протекающего по ним тока и, следовательно, предотвращения дальнейшего увеличения температуры. Такое качество саморегулирования позволяет исключить применение специальных устройств для ограничения температуры, защиты от перегрева и сверх токов. Важными преимуществами нагревателей на основе элементов с ПТК для применения в составе климатических установок транспортных средств является их взрыво- и пожаробезопасность, длительный срок службы, высокая энергоэффективность и удельная мощность [7, 8].

В составе системы отопления и кондиционирования воздуха ТС энергоэффективные нагреватели могут быть использованы двумя основными способами:

- интеграция в системе циркуляции воздуха для его непосредственного нагрева при подаче в салон ТС;
- использование в составе агрегата жидкостного отопителя салона.

Условием, открывающим возможность использования данных решений, является наличие на борту ТС источника электроэнергии высокого напряжения, с помощью которого можно обеспечить необходимую мощность климатической установки при минимальной силе потребляемого тока [9, 10]. Такое условие выполняется на электромобилях и гибридных автомобилях. Следует отметить, что требуемая мощность системы кондиционирования воздуха варьируется в зависимости от типа ТС и его назначения. Для легковых электромобилей номинальная мощность электрического компрессорного агрегата в среднем составляет значение 3,5…4,0 кВт. Для электробусов аналогичный показатель выше и принимает значения от 7 кВт до 25 кВт. Последнее обусловлено бо́льшим объемом воздуха в салоне и более высокой тепловой нагрузкой (количество пассажиров, постоянное открытие дверей, приток теплого воздуха) в сравнении с легковым ТС. Номинальная мощность электрических отопителей несколько выше и, например, для легковых электромобилей находится в диапазоне 5…10 кВт.

Единственным источником энергии на борту электромобилей и электробусов является тяговая аккумуляторная батарея (ТАБ), которая призвана, в первую очередь, обеспечить работу электрического привода для осуществления движения ТС. Запас электрической энергии ТАБ и ее расходование на борту определяют пробег электромобиля на одном заряде. Поскольку функционирование кондиционера связано с дополнительным потреблением электрической энергии, то его работа неотъемлемо ведет к снижению запаса хода электромобиля, т.к. на обеспечение как такого движения ТС остается меньше энергии. На итоговую величину запаса хода ЭМ оказывают влияние несколько факторов, среди них: режим и условия движения (в том числе дорожные, климатические), загрузка (количество пассажиров), конструкция ТС и др. Причем эти факторы правомочно применить и к степени снижения запаса хода от работающего кондиционера. Так, например, количество пассажиров определяет величину тепловыделения в салоне, которую необходимо компенсировать требуемой холодопроизводительностью. Конструкция кузова и применяемые материалы влияют на теплоизоляционные свойства, а значит и потери холода. Пассажиропоток и характе-

ристика маршрута, применительно к электробусам, связаны с фактом и продолжительностью открытия дверей, что также обуславливает температурные потери. Это лишь некоторые факторы, которые в конечном итоге определяют требуемую холодопроизводительность климатической установки, потребляемую от ТАБ мощность и расход электроэнергии, а значит и запас хода.

Помимо этого, режим движения ТС также связан с эффективностью работы системы кондиционирования. Так, движение ТС в условиях города, характеризующееся низкой средней скоростью, значительной долей остановок в общем времени маршрута, приводит к менее интенсивному отводу тепла от конденсатора кондиционера, большему времени работы теплоотводящих вентиляторов. Тогда как при движении с относительно высокой скоростью на транспортной магистрали активно используется поток набегающего воздуха для аналогичной цели.

По различным оценкам снижение запаса хода типового легкового электромобиля от работающего кондиционера составляет:

- в городских условиях движения – 18…28 %;
- движение по автомагистрали (загородный цикл) – 3…12 %;
- в смешанном цикле – 12…18 %.

Данные приведены для температуры окружающей среды 35 ºС и для городского цикла учитывают стадию начального охлаждения салона - ситуацию, когда электромобиль до начала движения находился на открытом воздухе.

Так, например, для электромобиля BMW i3 (2014 модельного года и при запасе энергии батареи 18,8 кВт·ч) удельный расход электрической энергии в городском цикле (UDDS – Urban Dynamometer Driving Schedule) составляет 118,0 (Вт·ч)/км без работающего кондиционера и 145,2 (Вт·ч)/км с кондиционером, что обеспечивает пробег на одном заряде 159 км и 129 км соответственно.

По данным испытаний INL (США) достаточного популярного в России электромобиля Nissan Leaf (не самой новой модели – 2013 модельного года), который зачастую приобретают бывшим в употреблении (с пробегом из Японии) запас хода в городе (цикл UDDS) при включенной системе кондиционирования воздуха снижается примерно на 51 км или ~28 % относительно пробега в нормальных климатических условиях (182 км в том же цикле). Следует учесть, что представленные данные не учитывают факт деградации аккумуляторов и снижение емкости батареи.

Снижение запаса хода от работающего кондиционера в смешанном цикле при температуре окружающего воздуха 35 ºС другого электромобиля - Tesla Model 3 2019 года выпуска, характеризуется средним значением около 15 %.

Для полноты картины следует привести данные по снижению запаса хода легковых электромобилей в холодное время года:

- в городских условиях движения при холодном старте – 54…61 %;
- в городских условиях движения с нормальной начальной температурой – 38…52 %;
- движение по автомагистрали (загородный цикл) – 25…35 %.

Данные приведены для температуры окружающей среды -7 ºС и основаны на значениях удельных расходов электроэнергии нескольких транспортных средств, в том числе: KIA Soul, Nissan Leaf, BMW i3, Chevy Spark.

В части систем кондиционирования для электромобильного транспорта технологии не стоят на месте. Необходимость сокращения расхода драгоценной (с точки зрения преодолеваемого электромобилем расстояния) электроэнергии на борту учитывается производителями электромобилей и компонентной базы для них. Потенциальное снижение энергопотребления на обеспечение комфортной температуры воздуха в салоне за счет реализации известных и перспективных решений применительно ко всему комплексу климатического оборудования и транспортному средству в целом может достигнуть в совокупности 67%. К таким решениям следует отнести:

- активное использование рециркуляции воздуха салона и оптимизацию процесса воздухообмена;
- совершенствование конструкций механической части компрессоров кондиционеров;
- использование перспективных хладагентов с более низкими значениями температуры кипения в сравнении с традиционными;
- улучшение теплоизоляционных свойств кузова.

В сравнении с легковыми электромобилями снижение запаса хода от работающей системы кондиционирования воздуха электробуса значительнее и может составлять 25…50 %. При этом типовые значения удельного расхода электроэнергии электробусов большого класса находятся в диапазоне 1,2…1,5 (кВт·ч)/км. Более критичным с точки зрения расхода электроэнергии является зимняя эксплуатация и связанная с этим необходимость отопления салона, в которой удельные расходы энергии могут превышать значение 2,5 (кВт·ч)/км. Факт значительных расходов энергии на электробусе связан с пассажиропотоком, открытием дверей, значительным объемом салона, более высокой мощностью системы кондиционирования воздуха. Однако в условиях развитой зарядной инфраструктуры, в частности, использования зарядных станций ускоренного заряда, установленных вдоль маршрута следования электробуса, снижение запаса хода не является столь критичным, как для частного легкового электротранспорта.

Экологическая безопасность и энергетическая эффективность электромобиля неразрывно связаны с технологией производства электрической энергии и видом первичного топлива. В большинстве случаев именно стадия использования энергии от источника первичного топлива до тяговой батареи, включающая процесс выработки электроэнергии на электростанции, оказывает преобладающее влияние на экологическую составляющую эксплуатации электромобильного транспорта. Таким образом, оценку углеродного следа можно сделать на основании установленных значений выбросов парниковых газов с учетом структуры производства электрической энергии в регионе использования электромобиля. Так, например, в Центральном федеральном округе первое место по выработке электроэнергии занимают тепловые электростанции (ТЭС), работающие на природном газе (около 53 % по прогнозу на 2025 год), а второе – атомные электростанции (39 % в 2025 г.), тогда как на долю наиболее экологически негативных ТЭС на угле приходится всего 4 %. Для схожей структуры производства электроэнергии среднее значение удельных выбросов парниковых газов в эквиваленте CO_2 на примере электромобиля BMW i3 составляет 50…56 г CO_2-экв. на 1 км пути. Данные приведены для нормальных климатических условий без работающего кондиционера. С учетом вышесказанного в отношении увеличения расхода электрической энергии от работающей системы кондиционирования воздуха на данном электромобиле (для BMW i3 значения удельного расхода в Втч/км были приведены выше) следу-

ет ожидать пропорциональное увеличение выбросов парниковых газов на 23 % – т.е. до 62…69 гCO_2-экв/км. Дополнительное потребление электроэнергии на борту – дополнительные выбросы парниковых газов при производстве электрической энергии. Следует отметить, что при преобладании в структуре выработки электрической энергии возобновляемых источников (ветро-, фото-, гидроэлектрических станций) значения выбросов парниковых газов будут неуклонно снижаться. И наоборот, преобладающее использование ТЭС на угле может свести на нет все преимущества электромобильного транспорта, несмотря и на отсутствие как таковых выбросов в месте эксплуатации ТС.

Для оценки влияния работы систем кондиционирования воздуха на автотранспорте можно также привести данные International Energy Agency, опубликованные в аналитическом отчете «Cooling on the Move: The future of air conditioning in vehicles», 2019. Так, по данным указанного источника, выбросы парниковых газов, обусловленные работой систем кондиционирования дорожных автотранспортных средств, составляют 420 млн.т CO_2-эквивалента в 2015 году, что сравнимо с 1% всех мировых выбросов CO_2 в секторе энергетики. При этом более двух третей этих выбросов обусловлено сгоранием топлива, тогда как остальная часть - результат прямой утечки хладагента.

В части влияния утечки хладагента в окружающую среду также следует отметить нацеленность на использование в электромобилях хладагентов, экологически более безопасных, чем широко применяемый R134a.

Список литературы

1. Ютт В.Е. Оценка стабильности технических характеристик типовых конструкций электромеханических усилителей рулевого управления автомобиля / В. Е. Ютт, В. Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. 2007. № 6. С. 2-4. EDN IJLHSL.

2. Козловский В.Н. Компьютерное моделирование стартер-генератора легкового автомобиля / В. Н. Козловский, В. Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. 2009. № 4. С. 32-34.

3. Козловский В.Н. Комплекс обеспечения качества системы электрооборудования автомобилей / Козловский В.Н., Панюков Д.И. // Saarbrücken, 2014.

4. Дебелов В.В. Электронная система регулирования скорости движения автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости / Дебелов В.В., Иванов В.В., Козловский В.Н., Строганов В.И., Ютт В.Е. // Грузовик. 2013. № 12. С. 19-23.

5. Козловский В.Н. Моделирование энергоемких накопителей автомобильной комбинированной энергоустановки / Козловский В.Н., Строганов В.И., Дебелов В.В., Петровский С.В. // Грузовик. 2018. № 11. С. 13-14.

6. Козловский В.Н. Модели аналитических исследований качества и надежности легковых автомобилей в эксплуатации / Козловский В.Н., Строганов В.И., Клейменов С.И. // Автомобильная промышленность. 2013. № 9. С. 1-5.

8. Козловский В.Н. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1. / Козловский В.Н., Строганов В.И., Дебелов В.В., Пьянов М.А. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2014. Т. 10. № 1. С. 40-49.

9. Козловский В.Н. Аналитический комплекс прогнозирования надежности электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В.Н. Козловский, Н.И. Горбачевский, А.Г. Сорокин, В.Б. Кислинский, Л.Х. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 3. С. 227-229.

10. 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.

Сидоров Кирилл Михайлович, канд. техн. наук, доцент, k.sidorov@bk.ru, Россия, Москва, Московский государственный автомобильно-дорожный технический университет,

Козловский Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Kozlovskiy-76@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет,

Панюков Дмитрий Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, dip-home@yandex.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

ON THE ISSUE OF THE INFLUENCE OF AIR CONDITIONING UNIT OPERATION ON THE RANGE OF AN ELECTRIC VEHICLE

K.M. Sidorov, V.N. Kozlovsky, D. I. Panyukov

The article presents the results of a study of the influence of the climate control system on the range of an electric vehicle.

Key words: electric car, power reserve, air conditioning system.

Sidorov Kirill Mikhailovich, candidate of technical sciences, associate professor, k.sidorov@bk.ru, Russia, Moscow, Moscow automobile and road construction state technical university (MADI),

Kozlovsky Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, Kozlovskiy-76@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University,

Panyukov Dmitry Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, dip-home@yandex.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 621.398
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-413-414

ОПТИМИЗАЦИЯ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

И.В. Москаленко

В данной статье описывается методика оптимизации процесса определения состояния электрической кабельной сети на примере транзитной наземной кабельной сети космического аппарата космического ракетного комплекса «Ангара».

Ключевые слова: космический ракетный комплекс «Ангара»; транзитная наземная кабельная сеть космического аппарата; состояние электрической кабельной сети; оптимизация коммутации.

В настоящее время, своевременное наращивание и восполнение орбитальной группировки космических аппаратов лежит в основе многих процессов по поддержанию обороноспособности Российской Федерации. Для обеспечения своевременности восполнения орбитальной группировки, боевые расчеты подготовки и пуска РКН сталкиваются с необходимостью решения множества различных задач, немаловажными из которых являются задачи по определению технического состояния космических средств.

Как показывает практика, в ходе процесса подготовки к пуску и пуска РКН, длительность операций по определению технического состояния космических средств занимает до 40% от общего времени подготовки. Одними из наиболее времязатратных, являются операции по определению технического состояния электрических цепей и связей внутри приборов и агрегатов, входящих в состав космических средств, что и обуславливает необходимость сокращения времени, затрачиваемого на проведение этого вида проверок при сохранении полноты и качества проведения операций.

Основным направлением, позволяющим сократить время на проведение диагностики технического состояния электрических кабельных сетей, является модернизация существующих и разработка новых средств диагностики. Однако в настоящее время дальнейшее улучшение таких средств практически достигло своего технического предела.

Используемые в настоящее время средства диагностики технического состояния электрических кабельных систем (ЭКС) состоят из блока коммутации, измерителя электрического сопротивления и блока сравнения полученного результата изменения с эталоном (набором эталонов). Таким образом, длительность контроля технического состояния электрических цепей (T) зависит от:

- количества коммутаций (переключений) электрических цепей (N);
- времени, затраченного на проведение одного замера электрического сопротивления между двумя точками проверяемой электрической цепи (с учетом времени, затраченного на проведение сравнения результата измерения с эталоном) ($t_{зам}$);
- времени коммутации одной цепи средством технического диагностирования ($t_{ком}$);

и может быть записана в следующем виде:

$$T_{общ} = N * (t_{зам} + t_{ком}) \cdot \quad (1)$$

В ходе развития средств технического диагностирования в последние десятилетия в среднем, время диагностирования сократилось на $\approx 45\%$ за счет снижения $t_{зам}$ и $t_{ком}$, но дальнейшее уменьшение этих параметров затруднено из-за близости к пределу технических возможностей средств диагностирования. Другой вариант, слабо проработанный в наше время, это сокращение N количества коммутаций электрических цепей при проведении контроля состояния ЭКС.

В состав космического ракетного комплекса «Ангара» (далее по тексту – КРК «Ангара») входит транзитная наземная кабельная сеть контрольно-проверочной аппаратуры космического аппарата (далее – ТНКС КПА КА).

ТНКС КПА КА предназначена для организации электрической связи между бортовыми транзитными кабелями КА и контрольно-проверочной аппаратурой КА, размещенной в помещениях технического (ТК) и универсального стартового комплексов (УСК). В состав ТНКС КПА КА входят:

1. Комплект кабелей;
2. Вспомогательное технологическое оборудование:

- шкафы соединительные;
- устройство контроля сопротивления изоляции (УКСИ);
- универсальный кабельный разъем (УКР).

Проведение технического обслуживания на ТНКС КПА КА, в том числе предпускового при подготовке ТК и УСК к работе со штатным изделием, а также использование его при подготовке РКН к пуску, заключается в проведении операций по определению технического состояния цепей связи между контрольно-проверочной аппаратурой и космическим аппаратом (как наземную ее часть, так и бортовые транзитные цепи КА). При этом электрические цепи проверяются на целостность, разобщенность и величину сопротивления изоляции между каждой цепью и корпусом (землей). Проведение этих проверок из-за большого количества входящий в состав ТНКС кабелей, имело большую продолжительность.

Боевым расчетом было предложено оптимизировать выполнение проверок за счет объединения отдельных кабелей в тракты посредством входящих в состав ТНКС перемычек. Предприятие-изготовитель системы, после анализа предложения, включило возможность такой работы в эксплуатационную документацию, что позволило сократить время проведения ТО на $\approx 40\%$.

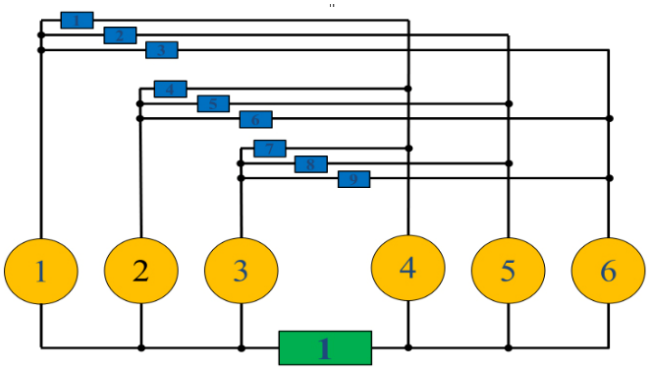
Анализ средства технического диагностирования, используемый на ТНКС КПА КА и представленный в виде УКСИ, позволил определить его достоинства и недостатки. В УКСИ используется метод электрической проверки исправности кабелей «точка-точка», то есть проверка значения электрического сопротивления между двумя любыми цепями.

Так как при определении технического состояния кабельной сети оценивается только значение электрического сопротивления и допусковое оценивание показателей исправного состояния электрических цепей, а не точное его значение, то для оценивания сопротивления разобщения между проверяемыми цепями при проверке возможно электрическое соединение нескольких цепей в группы. При этом сопротивления разобщения между проверяемыми цепями объединяются по правилу параллельного соединения сопротивлений (2). Сопротивление разобщения между группами будет меньше или равно любому из сопротивлений разобщения цепей, входящих в проверяемые группы, то есть, если сопротивление разобщения между группами будет больше или равно минимально допустимому сопротивлению разобщения (определенному в ЭД), то сопротивление разобщения любой цепи, входящей в проверочную группу, будет однозначно больше или равно минимально допустимому сопротивлению разобщения (определенному в ЭД).

$$R_{общ} = \frac{R_1 * R_2 * ... * R_n}{R_1 + R_2 + ... + R_n}. \quad (2)$$

Рассмотрим на примере. На рисунке схематично изображена кабельная сеть из 6 разобщенных электрических цепей. Задача – проверить разобщенное состояние между каждой цепью. Использование метода замера «группа-группа» позволяет при объединении цепей в две группы по три цепи за один замер оценить разобщенное состояние девяти пар (3^2) цепей, тогда как метод «точка-точка» потребовал бы провести девять замеров с девятью же перекоммутациями цепей.

Если рассмотреть процесс определения технического состояния кабельной сети, состоящей из четырех разобщенных цепей, то для полного оценивания разобщенности цепей различными методами понадобится разное количество замеров (табл. 1).



Проверка разобщенного состояния ЭКС разными методами

Таблица 1

Количество измерений для различных методов

№ замера	«точка-точка»		«точка-группа»		«группа-группа»	
	I	II	I	II	I	II
1	1	2	1	234	12	34
2	1	3	2	134	13	24
3	1	4	3	124		
4	2	3	4	123		
5	2	4				
6	3	4				

Используя методы комбинаторики (3), (4), (5), приведены оценочные расчеты предельных количеств замеров для кабельной сети, имеющей n=50 проверяемых на разобщение цепей (табл.2)

Таблица 2

Результаты расчета предельных количеств замеров для 50 цепей

«точка-точка»	«точка-группа»	«группа-группа»
A_n	$B_{n\,min}$	$C_{n\,min}$
	50	25
1225	$B_{n\,max}$	$C_{n\,max}$
	100	50

A_n – количество замеров; $B_{n\,min}$, $C_{n\,min}$, $B_{n\,max}$, $C_{n\,max}$ – минимальное и максимальное количество замеров.

$$A_n = A_{n\max} = A_{n\min} = \frac{n*(n-1)}{2}; \quad (3)$$

$$B_{n\min} = n; \quad B_{n\max} = 2n; \quad (4)$$

$$C_{n\min} = \frac{n}{2}; \qquad C_{n\min} = \frac{n+1}{2}; \qquad C_{n\max} = n. \quad (5)$$

(при n – четное) (при n – нечетное)

Очевидно, что в общем виде в состав ЭКС входят различные электрические цепи, приборы, датчиковая и коммутационная аппаратура, а средства диагностирования могут подключаться к различным концам или участкам цепей. Исходя из этого, в ЭКС могут присутствовать несколько видов электрических цепей:

- разобщенные электрические цепи – цепи, гальванически развязанные (не имеющие сообщения между собой);

- сообщенные электрические цепи – цепи, соединенные между собой (короткозамкнутые);

- связанные электрические цепи – цепи, между которыми есть связь, обусловленная наличием приборов, коммутационной аппаратуры.

Кроме этого, для определения технического состояния кабельной сети может использоваться дополнительное оборудования или приспособления, такие как технологические заглушки, электрические перемычки и вспомогательные приборы.

Все это приводит к усложнению поиска оптимальной последовательности коммутаций электрических цепей, при проверке ЭКС, обеспечивающую минимум количества коммутаций для обеспечения наименьшего времени прохождения проверки.

Однако в нашем конкретном случае, в состав ТНКС КПА КА входят ЭКС исключительно с разобщенными электрическими цепями, что позволяет внедрить в работу метод проверки «группа-группа».

При проведении проверок ЭКС, входящих в состав ТНКС КПА КА, кроме разобщенности цепей, проверяется так же целостность и сопротивление каждой цепи на корпус.

Для проведения проверки сопротивления изоляции между электрической цепью и корпусом, предлагается использовать технологические заглушки (входящие в состав системы), соединяющие все цепи одного кабеля в одну и проводить один замер объединенной цепи на корпус. Если результат измерения будет больше или равен минимально допустимому значению сопротивления изоляции (определенному в ЭД), это позволит сделать вывод о соответствии каждой цепи, входящей в объединенную группу критерию «норма». При получении значения, не соответствующего критерию «норма» - провести проверку по методу «точка-точка» для определения цепи, имеющей повреждение изоляции. Кроме того, в настоящее время, при проведении замеров УКСИ производит сравнение измеренного значения с набором эталонов по принципу «от меньшего к большему», что при проверке сопротивления изоляции (значения от 5 МОм и выше) приводит к увеличению $t_{зам}$. Учет ожидаемой величины результата измерения при разработке (исправлении) программного обеспечения и выбора в связи с этим сверки результата измерения с набором эталонов по принципу «от меньшего к большему» или «от большего к меньшему», позволит сократит время, затраченное на проверку от 10 до 30%.

В заключение, можно сделать вывод, что внедрение рассмотренного в статье метода проведения проверки технического состояния ЭКС позволит значительно сократить время, затрачиваемое на проведение операций по подготовке ТНКС КПА КА к работе с изделием без потери качества и эффективности диагностики, что в свою очередь повысит коэффициент готовности системы и КРК в целом и повлияет на успешность выполнения целевых задач.

Москаленко Игорь Валериевич, инженер-испытатель, graaf253@mail.ru, Россия, Мирный, Войсковая часть 75117

OPTIMIZATION OF ELECTRICAL CIRCUIT SWITCHING TO DETERMINE THE STATE OF ELECTRICAL CABLE SYSTEMS

I.V. Moskalenko

This article describes a method for optimizing the process of determining the state of the electrical cable systems using the example of a transit ground cable network of the spacecraft of the Angara space rocket complex.

Key words: Angara space rocket complex; transit ground cable network of the spacecraft; state of the electrical cable network; switching optimization.

Moskalenko Igor Valerievich, test engineer, graaf253@mail.ru, Russia, Mirny, Military unit 75117

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 544.654.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-416-417

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 20 ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ И ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕМ УПРОЧНЯЮЩИХ Co-W ПОКРЫТИЙ

С.А. Силкин, С.А. Кусманов, А.С. Перков, О.Л. Алтухова

В работе изучены трибологические свойства покрытий, полученных комбинированной обработкой. Обработка включала в себя насыщение поверхности стали углеродом (методом электролитно-плазменной цементации), удаление оксидного слоя с поверхности (методом электролитно-плазменной полировки) и нанесение гальванических хромовых и Co-W покрытий. Износостойкость поверхности Co-W покрытия оказалась более чем в 50 раз выше, чем у хромового покрытия как при возвратно-поступательном методе измерения износа, так и в условиях линейного трения.

Ключевые слова: комбинированная обработка, гальванические Co-W покрытия, износостойкость, электролитно-плазменная цементация, электролитно-плазменная полировка.

Диффузионное насыщение поверхности стали углеродом, известно еще с 17века [1]. С его помощью поверхность металла насыщается углеродом и появляется возможность за счет термообработки, повысить функциональные свойства поверхности, при сохранении начальных свойств в глубине детали. Наиболее часто применяемое печная цементация обладает некоторыми недостатками, главным из которых это ее продолжительность, измеряемая часами, иногда десятками часов, что вкупе с высокой температурой процесса, экономически затратно [2-5].

Цементация некоторыми другими способами более быстра, но все равно ее длительность в рамках десятков минут- часов [6-11].

В последние годы успешно развиваются электролитно-плазменные процессы диффузионного насыщения металлов и сплавов, также называемые электрохимико-термической обработкой [5]. Применяемый термин «электролитно-плазменные методы» охватывает десятки технологий, которые значительно отличаются не только практическим назначением, но и физико-химическими условиями их осуществления.

Одним из существенных недостатков методом электролитно-плазменного насыщения, является образование на поверхности детали, оксидного слоя, толщиной единицы-десятки микрометров, разного рода сплошности.

Один из вариантов удаления этого оксидного слоя является электролитно-плазменная полировка поверхности, позволяющая за единицы минут, удалить оксидный слой и активировать поверхность [12].

Таким образом, последовательным использованием двух электролитно-плазменных технологий: насыщения и полировки возможно получить упрочненную поверхность детали, без оксидного слоя. Но, как показано во многих работах, коррозионные свойства поверхности, насыщенной углеродом хуже, чем исходной [7, 10-13].

В работе [14] показано многократное повышение износостойкости поверхности после электролитно-плазменного насыщения, но с учетом плохой коррозионной стойкости, применение данных материалов затруднительно.

Гальванические Co-W покрытия уже давно позиционируются как замена хромовым [15-17] , и обладают заметно более высокой коррозионной стойкостью по сравнению со стальными поверхностями, но ввиду их большой твердости (порядка 1000HV) они довольно хрупки, и при осаждении на не термообработанные поверхности углеродистых сталей с твёрдостью 200-300HV, не могут работать при больших нагрузках трения, так как покрытие продавливается и разрушается.

Решением этих проблем может стать осаждение функциональных покрытий, на поверхность упрочненную методом электролитно-плазменного насыщения с удаленным оксидным слоем.

Цель данной работы, продемонстрировать возможность комбинированной обработки поверхности стали 20, путем ее насыщения методом электролитно-плазменной цементации, удаления оксидного слоя методом электролитно-плазменной полировки и гальванического осаждения Co-W покрытий и изучить износостойкость такого рода комбинированных покрытий.

Экспериментальная часть. Образцами служили цилиндры из стали 20 (0,21% углерода), с доведенной методом шлифовки шероховатостью ~0,5мкм по Ra.

Электролитно-плазменная цементация проводилась в установке описанной в [13] с использованием электролита 10 масс% хлорида аммония, 10 масс% глицерина, при температуре обработки 850ºС в течении 5 минут. Этого было достаточно, чтобы получить толщину упрочненного слоя более 100 мкм.

Электролитно-плазменная полировка была проведена при напряжении 300В, в течении 3 минут, в электролите состава 5% хлорида натрия, полируемый образец являлся анодом.

После полировки, образцы были отмыты в ультразвуковой ванне и высушены в среде теплого воздуха, после чего проводилась активации поверхности в растворе 7% соляной кислоты, при комнатной температуре в течении 3 минут. Сразу после активации поверхности и промывки было проведено осаждение Co-W и хромовых покрытий на торцевую часть цементованного и полированного образца.

Осаждение покрытий Co-W проводилось из цитратного электролита следующего состава (моль/л): $CoSO_4 \cdot 7H_2O$-0,2, $Na_2WO_4 \cdot 2H_20$-0,2, H_3BO_3-0,65, лимонная к-та $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$-0,04, цитрат натрия $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 5{,}5H_2O$-0,25, при pH 6,7 температуре электролита 80°C, плотности тока 20мА/см^2 и объемной плотности тока равной 70мА/л. Время осаждения было выбрано 2 часа. В качестве анода использовался графитовый электрод площадью 20см^2. Анализ состава покрытия производился методом ренгенофлюоресцентного анализа с помощью Olympus DP-2000.

Изменение массы образцов определялось на аналитических весах Vibra AF225 с разрешением ±0,00001 г. Микротвердость образцов измерялась с использованием микротвердомера Falcon 503 (Нидерланды) при нагрузке на индентор Виккерса 25г ($HV_{0.25}$).

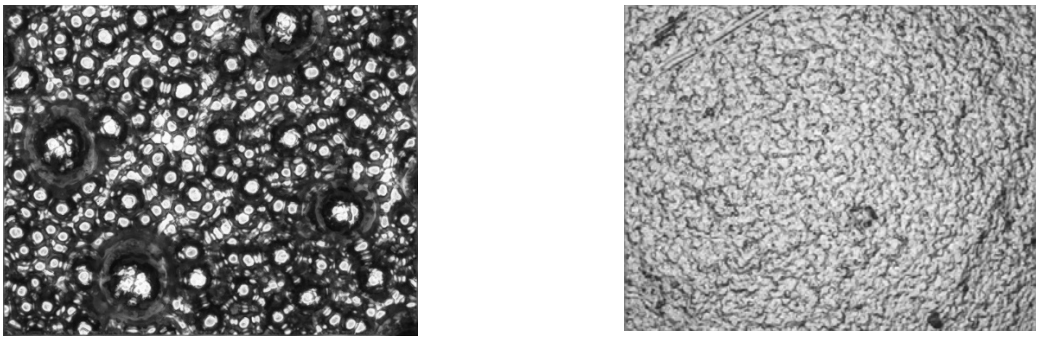
Хромовое покрытие, используемое для сравнения результатов износостойкости, было получено из стандартного электролита хромирования (250 г/л CrO_3, 2,5 г/л H_2SO_4) при температуре 55°C и плотности тока 50А/дм^2.

Трибологические измерения были выполнены по схеме трения шар/поверхность в варианте линейного трения при скорости 0,3м/с (радиус трения 4,4 мм) и в варианте возвратно-поступательного трения с длиной трассы 1мм (reciprocating wear) со скоростью 67 двойных ходов/мин. Путь трения составил 500 и 32 метра соответственно. Контр-тело в обоих случаях шар из корунда диаметром 6,35мм твердостью ~2500HV, используемая нагрузка 5Н.

Профиль дорожек трения, как и шероховатость поверхности получен с использованием профилометра TR200.

Результаты и их обсуждение. Полученное на цементованной поверхности предварительно очищенной методом электролитно-плазменной обработкой Co-W покрытие содержало (по данным рентгено-флюоресцентного анализа) ~24ат% W, что хорошо согласуется с литературными данными по осаждению Co-W покрытий. Шероховатость поверхности образцов Co-W покрытия составила ~2,4±0,1мкм по параметру Ra, выход по току покрытия составил 78%, твердость покрытия 985±18HV.

Шероховатость хромового покрытия ~0,35±0,02мкм по параметру Ra, выход по току покрытия составил 12%, твердость 1143±30HV. Морфология поверхности покрытий представлена на рис. 1.



а ***б***

Рис. 1. Морфология поверхности Co-W (а) и хромового (б) покрытия. (увеличение x1000)

Видно, что размеры глобулярных частиц Co-W покрытия довольно большие, и достаточно неоднородные, что может вызвать проблемы с возвратно-поступательным износом, так как величина шероховатости, будет соизмерима с глубиной дорожки трения и ее будет невозможно точно измерить. Поэтому для проведения возвратно-поступательного износа поверхность после осаждения шлифовалась до величины 0,1мкм по Ra наждачной бумагой зернистостью 2000.

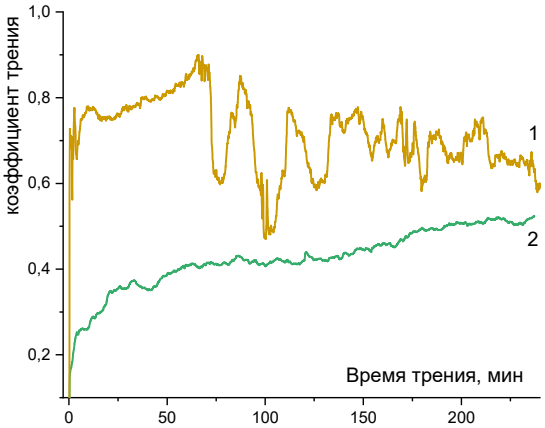


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения изучаемых поверхностей от пути трения в случае возвратно-поступательного износа (1-хромовое, 2-Co-W покрытие)

Результаты износа при возвратно-поступательном механизме проведения испытаний представлены на рис. 2. По представленным данным можно сделать вывод, что величина коэффициента трения для хромового покрытия значительно выше, чем для Co-W. Особый интерес представляет начало износа, в случае хромового покрытия, видно, что в первые пять минут успевает образоваться промежуточное тело и коэффициент трения стабилизируется, но после часового испытания коэффициент трения становится нестабильным и осциллирует, что мы связываем с накопление продуктов износа и их вытеснением из зоны контакта. При трении же Co-W покрытий на протяжении всего процесса трения идет плавное повышение коэффициента трения, что мы связываем с окислением продуктов трения и их участия в абразивном износе поверхности. Анализ дорожки трения Co-W покрытия (рис.3) подтверждает предположение о абразивном характере износа. Анализ сечения дорожки износа представленной на рис.3 позволяет сделать вывод о значительно большей износостойкости Co-W покрытия в данной паре трения по сравнению с хромовым, причем если посчитать объем износа, по представленным фотографиям, то объем износа Co-W покрытия будет ниже более чем в 50 раз (55 раз).

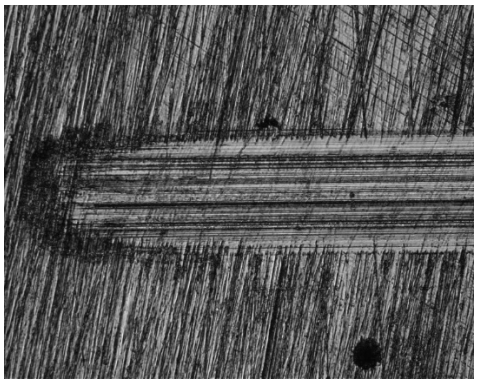


Рис. 3. Микрофотография части дорожки трения Co-W покрытия для случая возвратно-поступательного трения (увеличение x100)

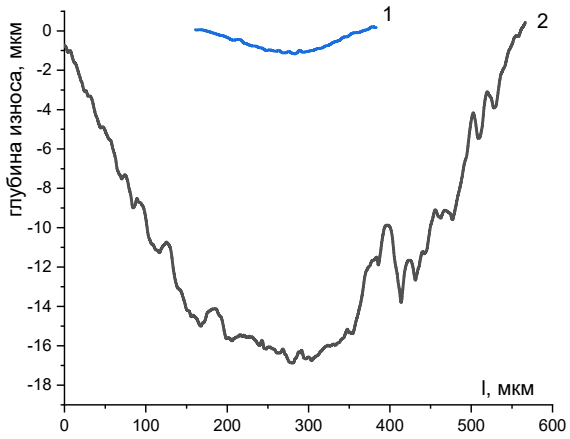


Рис. 4. Сечение дорожки трения изучаемых покрытий, сделанное на середине ее длины (возвратно-поступательный износ)

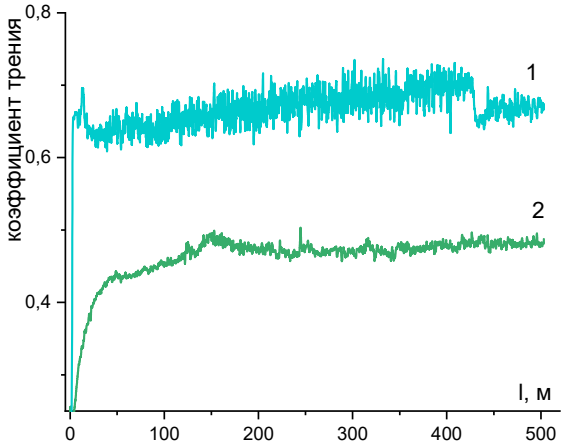
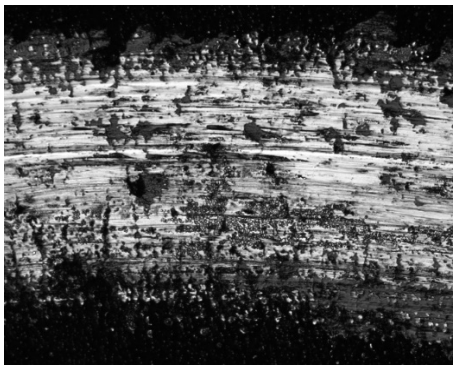


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения изучаемых поверхностей от пути трения в случае линейного износа (1-хромовое, 2-Co-W покрытие)

В случае линейного износа (рис.5-7) вследствие радиального вращения образца и удаления продуктов трения за счет центробежной силы, видно, что коэффициент трения что хромового, что Co-W покрытия достаточно стабилен, осцилляции уменьшились. Коэффициент трения хромового покрытия заметно выше, чем Co-W. Анализ микрофотографий поверхности дорожки износа и поверхности контр-тела, позволяет сделать вывод о абразивном характере износа как Co-W так и хромового покрытия. Видно, что все неровности контр-тела заполнены частицами продуктов износа покрытий, и в случае Co-W покрытий, видно, что они обеспечивают лучшее скольжение и их размер (судя по размеру царапин на дорожке трения) сильно меньше час в случае хромового покрытия.



Co-W покрытие

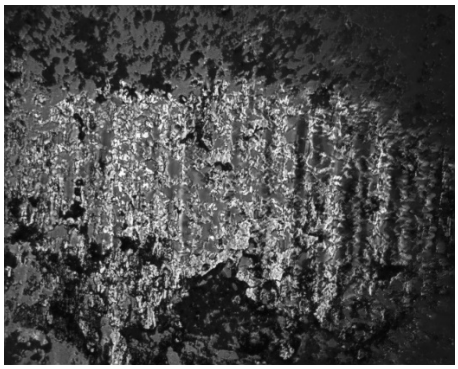
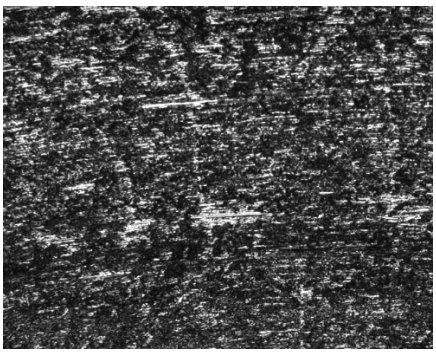


Фото износа контр-тела

Рис. 6. Микрофотография поверхности дорожки трения Co-W покрытия и контр-тела в месте контакта для случая линейного трения (увеличение x100).



Хромовое покрытие

Фото износа контр-тела

Рис. 7. Микрофотография поверхности дорожки трения хромового покрытия и контр-тела в месте контакта для случая линейного трения (увеличение x100)

При анализе массового износа Co-W покрытий с электролитическим хромовым покрытием, можно сделать вывод, что среднее значение износостойкости Co-W покрытия при данных параметрах трения в 60 раз выше и составляет 0,08мг (в случае хромового среднее значение износа составило 4,9±0,3 мг).

Вероятно, высокая износостойкость Co-W покрытий не связана с величиной микротвердости, так как микротвердость хромового покрытия существенно выше. А разница в том, что при износе Co-W покрытия в месте контакта образуется оксидный подслой, который работает как смазка и уменьшает воздействие контр-тела на непосредственно поверхность покрытия. А близкое значение отношения износа при разных его видах, объясняется использованием одинаковой пары трения, где контр-телом выступает оксид кремния, со значительно более высокой микротвердостью, чем у изучаемых покрытий.

Выводы. Проведена комбинированная обработка поверхности стали 20 методом электролитно-плазменного насыщения, полировки и гальванического осаждения Co-W покрытий.

Полученная адгезия покрытия к насыщенной углеродом основе позволила провести трибологические испытания и оценивается как удовлетворительная.

Показано понижение массового износа в условиях линейного трения в сравнении с хромовым покрытием в 60 раз

Показано понижение объема износа при возвратно-поступательном механизме трения в сравнении с хромовым покрытием в 55 раз.

Финансирование работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-20231) Костромскому государственному университету.

Список литературы

1.Asimov I. The Near East: 10,000 Years of History / Boston: Houghton Mifflin, 1968. 277 p.

2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. / Металловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

3. Kunst H., Haase B., Malloy J.C., Wittel K. et al / Metals, Surface Treatment. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2012. P. 44. DOI: 10.1002/14356007.a16_403.pub2.

4. Гуревич Ю.Г., Ляпина В.А. Патент РФ 2036243. Способ цементации стальных изделий. Опубл. 27.05.1995.

5. Химическая энциклопедия. / Т.5 Под ред. Н.С. Зефирова. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. С. 461.

6. Шипко А.А., Руденко С.П., Валько А.Л., Чичин А.Н. Высокотемпературная вакуумная цементация – резерв по снижению энергоемкости производства и улучшению качества зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин // Литье и металлургия, 2016, 83(2). P. 104–109.

7. Jumadin M.H., Abdulah B., Ismail M.H., Alias S.K. et al. // Key Eng Mater. 2017, 740. P. 93–99.

8. Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Пустовойт В.Н. Диффузионное насыщение углеродистой стали в режиме микродугового нагрева // МиТОМ. 2017, 739(1). P. 54–57.

9. Siambun N.J, Liew W.Y.H., Chen G.Z., Jewell D.A.et al. // Adv Mater Res. 2012, 576. P. 264–267.

10. Chen W., Feng P., Dong L., Ahangarkani M. et al.// Surf. Coat. Technol. 2018, 353. P. 300–308.

11. Czerwinski Frank. Thermochemical Treatment of Metals // Heat Treatment - Conventional and Novel Applications / InTech, 26 Sept. 2012. DOI: 10.5772/51566.

12. Kusmanov S.A., Tambovskii I.V., Korableva S.S., Silkin S.A., Smirnov A.A., Kusmanova I.A., Gorohov I.S. Increase in hardness and corrosion resistance of a medium-carbon steel surface using cathodic plasma electrolytic nitriding // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2022. Vol. 58. No 4. P. 323–329. DOI: 10.3103/S106837552204010X.

13. Apelfeld A., Borisov A., Dyakov I., et al. Enhancement of medium-carbon steel corrosion and wear resistance by plasma electrolytic nitriding and polishing // Metals, 2021, vol. 11. 1599 p.

14. Kusmanov S.A., Silkin S.A., Smirnov A.A., Belkin P.N. Possibilities of increasing wear resistance of steel surface by plasma electrolytic treatment // Wear, 2017, vol. 386–387. P. 239.

15.Tsyntsaru N., Cesiulis H., Donten M., Sort J. et al. Modern trends in tungsten alloys electrodeposition with iron – group metal // Surf. Eng. Appl. Electrochem., 2012, vol. 48, no. 6, p. 491. DOI: 10.3103/S1068375512060038.

16. Weston D.P., Harris S.J., Shipway P.H., Weston N.J., Yap G.N., Establishing Relationships between Bath Chemistry, Electrodeposition and Microstructure of Co-W Alloy Coatings Produced from a Gluconate Bath // Electrochimica Acta, 2010, 55. P. 5695–5708. DOI: 10.1016/j.electacta.2010.05.005.

17. Belevskii S., Silkin S., Tsyntsaru N., Cesiulis H., Dikusar A. The influence of sodium tungstate concentration on the electrode reactions at iron–Tungsten alloy electrodeposition // Coatings, 2021, 11(8), 981. DOI: 10.3390/coatings11080981.

Силкин Сергей Андрисович, канд. техн. наук, доцент, longamin@mail.ru, Россия, Кострома, Костромской государственный университет,

Кусманов Сергей Александрович, д-р техн. наук, директор института, sakusmanov@yandex.ru, Россия, Кострома, Костромской государственный университет,

Перков Александр Сергеевич, младший научный сотрудник, sachaperkow@gmail.com, Россия, Кострома, Костромской государственный университет,

Алтухова Ольга Леонидовна, младший научный сотрудник, aol99@list.ru, Россия, Кострома, Костромской государственный университет

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF THE SURFACE OF STEEL 20 BY ELECTROLYTIC-PLASMA HARDENING AND ELECTRODEPOSITION OF HARDENING Co-W COATINGS

S.A. Silkin, S.A. Kusmanov, A.S. Perkov, O.L. Altukhova

Tribological properties of coatings obtained by combined processing are studied in the work. Processing includes saturation of the steel surface with carbon (by the method of electrolytic plasma cementation), removal of the oxide layer from the surface (by the method of electrolytic plasma polishing) and application of galvanic chromium and So-W coatings. The surface wear resistance of the Co-W coating was found to be more than 50 times higher than that of the chromium coating, both in reciprocating wear measurement and in linear friction conditions.

Key words: combined processing, galvanic So-W coatings, wear resistance, electrolytic-plasma cementation, electrolytic-plasma polishing.

Silkin Sergey Andrisovich, candidate of technical sciences, docent, longamin@mail.ru, Russia, Kostroma, Kostroma State University,

Kusmanov Sergey Aleksandrovich, candidate of technical sciences, director of the institute, sakusmanov@yandex.ru, Russia, Kostroma, Kostroma State University,

Perkov Alexander Sergeevich, researcher, sachaperkow@gmail.com, Russia, Kostroma, Kostroma State University,

Altukhova Olga Leonidovna, researcher, aol99@list.ru, Russia, Kostroma, Kostroma State University

УДК 621.941-229.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-421-422

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЖИМНОГО УСТРОЙСТВА ТОКАРНОГО СТАНКА НА БАЗЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ

В.Р. Купцов, С.В. Лядник, А.В. Исаев

В статье описывается один из этапов решения комплексной задачи разработки и исследования оригинальной системы пневматического зажима заготовки на базе пропорционального пневматического электронного регулятора в составе отечественного прецизионного токарного станка с числовым программным управлением. В результате математического моделирования определены оптимальные параметры регулятора, что позволяет минимизировать деформацию заготовки при зажиме, повысив тем самым качество и производительность токарной обработки.

Ключевые слова: пневматические зажимные устройства, пропорциональный пневматический электронный регулятор, математическое моделирование, проектирование металлообрабатывающих станков

Разработка новых конструкций прецизионных токарных станков с числовым программным управлением, а также их отдельных узлов и деталей, относится к наиболее приоритетным задачам российской станкоинструментальной отрасли. При этом изменение усилий зажима заготовок является одной из основных вспомогательных операций, которые необходимо проводить при работе с заготовками на станках такого типа. Ошибки при базировании и закреплении заготовок и, в частности, при регулировании усилий зажима, могут привести к снижению качества готовых изделий, особенно при обработке нежестких тонкостенных заготовок [1, 2, 3]. Поэтому важно создать такое зажимное устройство, которое позволило бы обеспечить минимально допустимое усилие зажатия заготовок различных форм и размеров.

Особенностью представленного в статье технического решения является интеграция с имеющимися системами числового программного обеспечения, что необходимо для получения значительных конкурентных преимуществ в условиях современных вызовов для промышленности России.

Постановка задачи и предлагаемые решения. Разрабатываемый отечественный горизонтальный прецизионный токарный станок (ГПТС с ЧПУ) [4, 5] предназначен для высокоточной токарной обработки тонкостенных деталей, применяемых в различных отраслях машиностроения. Станок может выполнять операции точения, фрезерования, нарезания резьбы, а также точения материалов повышенной твердости. Основными потребителями данного технологического оборудования являются машиностроительные предприятия, в том числе компании авиакосмической и приборостроительной отрасли. Для этих отраслей характерна проблема обработки деталей типа тел вращения, отличающихся относительно небольшими габаритами и малой толщиной стенок (3,0–1,0 мм и менее) [6], связанная с качеством зажима и фиксации в станочной оснастке. В этих условиях важно обеспечить контролируемое изменение усилий зажима заготовок.

Существуют решения проблемы деформации тонкостенных деталей при зажиме в патроне. Так, находят применение специальные материалы кулачков – например, некоторые производители предлагают базовые кулачки из алюминия с накладками из армированного стекловолокном пластика, имеющего высокий коэффициент трения и большой угол охвата для снижения деформаций заготовки *[7]*. Известны т. н. маятниковые кулачки, равномерно распределяющие зажимное усилие и имеющие большую площадь зажима. Используются многокулачковые (например, шестикулачковые) патроны, в которых зажимные кулачки двигаются попарно и могут быть блокированы для обеспечения точной центровки заготовки. Такой подход обеспечивает более высокую точность и качество обработки по сравнению со стандартными трехкулачковыми токарными патронами.

Применение традиционных механических и гидравлических патронов для решения этой задачи зачастую нецелесообразно. Механический патрон, контролируемый переменным усилием руки человека, не способен обеспечить повторяемости точности и усилия зажима. Гидравлический привод обеспечивает высокую точность регулировки усилия только при больших давлениях. Пневматические приводы лишены вышеуказанных недостатков и, кроме того, обладают рядом преимуществ – в частности, длительным сроком службы и минимальным объемом требуемого обслуживания. Также они могут использоваться в широком диапазоне температур и при высокой влажности.

В разрабатываемом ГПТС с ЧПУ для решения рассматриваемой задачи предложена оригинальная система пневматического зажима заготовки на базе пропорционального пневматического электронного регулятора давления. Этот быстродействующий регулятор давления связан с системой ЧПУ станка, которая непрерывно контролирует усилие зажима и подает корректирующий сигнал на регулятор в зависимости от способа закрепления заготовки и частоты ее вращения. Такое решение позволяет обеспечить постоянное усилие зажима заготовки при разных частотах вращения [8].

К основным элементам пневмопривода, влияющим на процесс управления зажимом заготовки, относятся:

1) Пропорциональный редукционный клапан давления КР02, необходимый для пропорционального управления давлением воздуха в полостях пневмоцилиндра. Далее в статье приводится математическая модель, связывающая закон изменения усилия зажима трехкулачкового патрона с пропорциональным напряжением на каналах управления клапана КР 02 в зависимости от частоты вращения шпинделя (и, соответственно, патрона).

2) Ресивер АК1, являющийся источником сжатого воздуха с постоянным давлением. Он служит также для поддержания усилия зажима при аварийных ситуациях при резком падении давления в пневмосистеме, давая возможность закончить процесс резания и отвести инструмент от заготовки.

3) Пневмоцилиндр зажима, представляющий собой силовой исполнительный механизм, обеспечивающий зажим и фиксацию заготовки посредством передачи усилия на трехкулачковый патрон.

4) Пневматический распределитель, применяющийся для смены направления зажима (снаружи или изнутри заготовки).

5) Пневмораспределитель, используемый для быстрого разжима заготовки и срабатывающий при разжиме одновременно с пневматическим распределителем.

Пневматические распределители и ресивер не влияют на результирующее давление зажима, а лишь определяют быстродействие зажимной системы, поэтому в рамках данной математической модели не рассматриваются.

Расчетная схема разрабатываемого пневмопривода показана на рис. 1. Пневматическая схема привода показана на рис. 2.

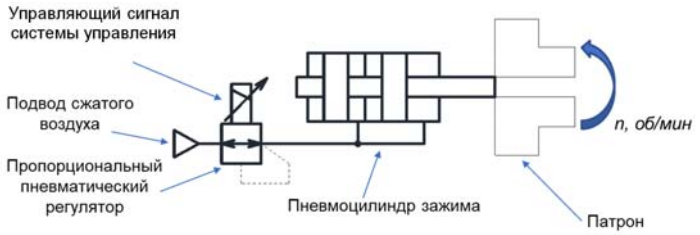


Рис. 1. Структурная схема пневматического привода зажима заготовки в составе разрабатываемого станка

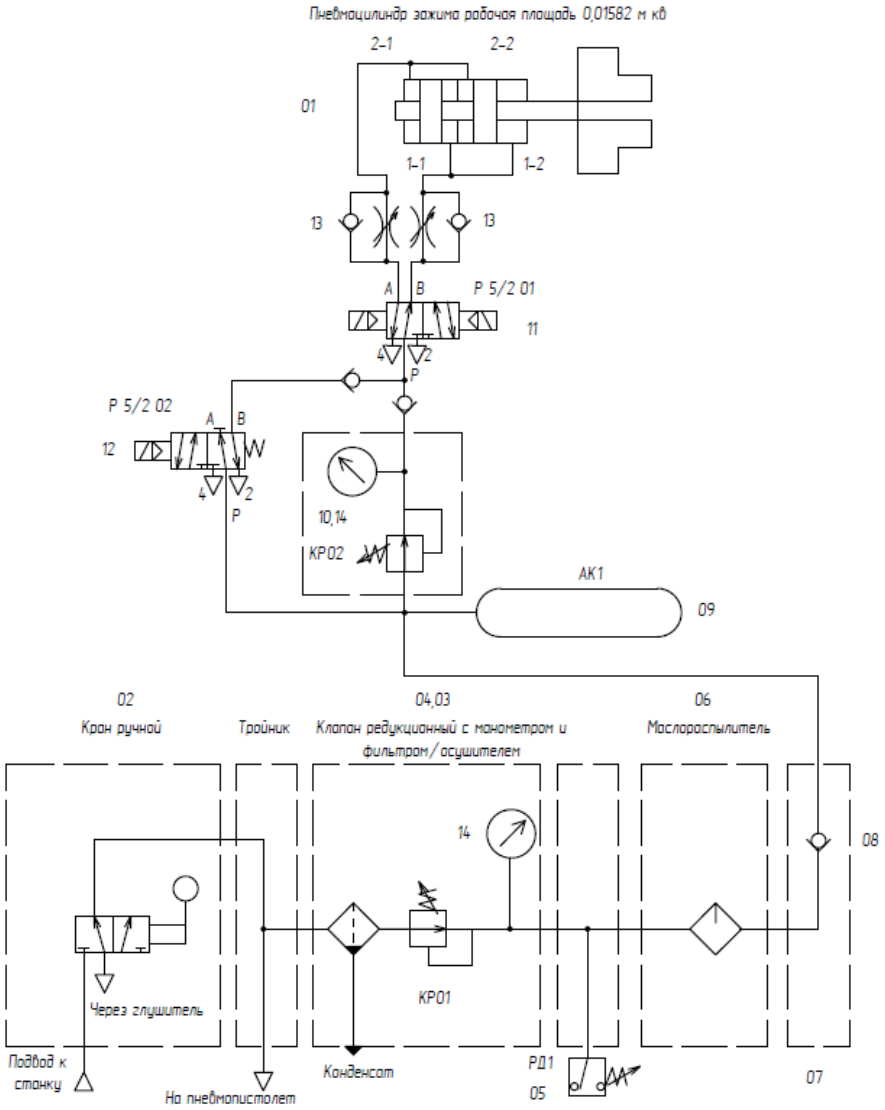


Рис. 2. Пневматическая схема привода зажима заготовки

Математическая модель зажимного устройства на базе пропорционального регулятора давления

При разработке математической модели, связывающей усилия зажима заготовки с управляющим воздействием на пропорциональном регуляторе давления, использованы следующие параметры:

1. Давление в системе. При регулировании усилий зажима заготовки важно не только величина давления, но и изменение его во времени, поскольку это влияет на точность обработки заготовки.

2. Усилие зажима. Это основной параметр регулирования, который необходимо настраивать при переналадке оборудования. При использовании пропорционального регулятора давления усилие зажима автоматически регулируется в зависимости от заданной нагрузки и позволяет достичь необходимых значений для каждой конкретной заготовки.

3. Частота вращения патрона в данной модели рассматривается как технологический параметр, определяемый параметрами процесса обработки. В модели предполагается, что частота вращения зависит исключительно от габаритов заготовки.

Расчет силы, возникающей при вращении патрона, выполняется по формуле:

$$F = mR\omega^2, \tag{1}$$

где m – масса кулачка, R – радиус вращения кулачка, ω – угловая скорость.

Угловая скорость через частоту вращения:

$$\omega = 2\pi n, \tag{2}$$

где n – количество оборотов в минуту (0–8000 об/мин)

Запишем (1) с учетом (2):

$$F = 4mR\pi^2 n^2.$$

Определим силу, передаваемую штоком пневмоцилиндра, по формуле

$$Q_{\text{П}} = FN_{\text{к}}K_{\text{тр}}\left(1+\frac{3a_{\text{к}}}{h_{\text{к}}}f_{\text{к}}\right)\frac{l_1}{l_{\text{к}}}, \tag{3}$$

где $N_{\text{к}}$– число кулачков патрона (три); $K_{\text{тр}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительные силы трения в патроне ($K_{\text{тр}}$ = 1,05); $a_{\text{к}}$ – вылет кулачка от его опоры до центра приложения зажима (конструктивно $a_{\text{к}}$ = 40 мм); $h_{\text{к}}$ – длина направляющей части кулачка, 70 мм; $f_{\text{к}}$ – коэффициент трения в направляющих кулачках 0,1 ($f_{\text{к}}$ = 0,1); l_1 и $l_{\text{к}}$ – плечи рычага привода, мм (конструктивно l_1 = 20 мм и l_2 = 100 мм до оси штока).

Подставим (2) в (3):

$$Q_{\text{П}} = 4mR\pi^2 n^2 N_{\text{к}}K_{\text{тр}}\left(1+\frac{3a_{\text{к}}}{h_{\text{к}}}f_{\text{к}}\right)\frac{l_1}{l_{\text{к}}}. \tag{4}$$

Передаваемая штоком сила в пневмоцилиндрах двустороннего действия равна:

$$Q_{\text{П}} = \frac{\pi D_{\text{ц}}^2}{4}P\eta_{\text{П}}, \tag{5}$$

где $D_{\text{ц}}$ – диаметр поршня пневмоцилиндра, мм; $\eta_{\text{п}}$ – коэффициент полезного действия пневмопривода, $\eta_{\text{п}}$ = 0,85; P – давление в системе, МПа.

Запишем уравнения (4) и (5) в виде:

$$\frac{\pi D_{\text{ц}}^2}{4}P\eta_{\text{П}} = 4mR\pi^2 n^2 N_{\text{к}}K_{\text{тр}}\left(1+\frac{3a_{\text{к}}}{h_{\text{к}}}f_{\text{к}}\right)\frac{l_1}{l_{\text{к}}}. \tag{6}$$

Отсюда выразим P, и получим зависимость частоты вращения от давления в системе:

$$P = \frac{4mR\pi^2 n^2 N_{\text{к}}K_{\text{тр}}\left(1+\frac{3a_{\text{к}}}{h_{\text{к}}}f_{\text{к}}\right)\frac{l_1}{l_{\text{к}}}}{\frac{\pi D_{\text{ц}}^2}{4}\eta_{\text{П}}}. \tag{7}$$

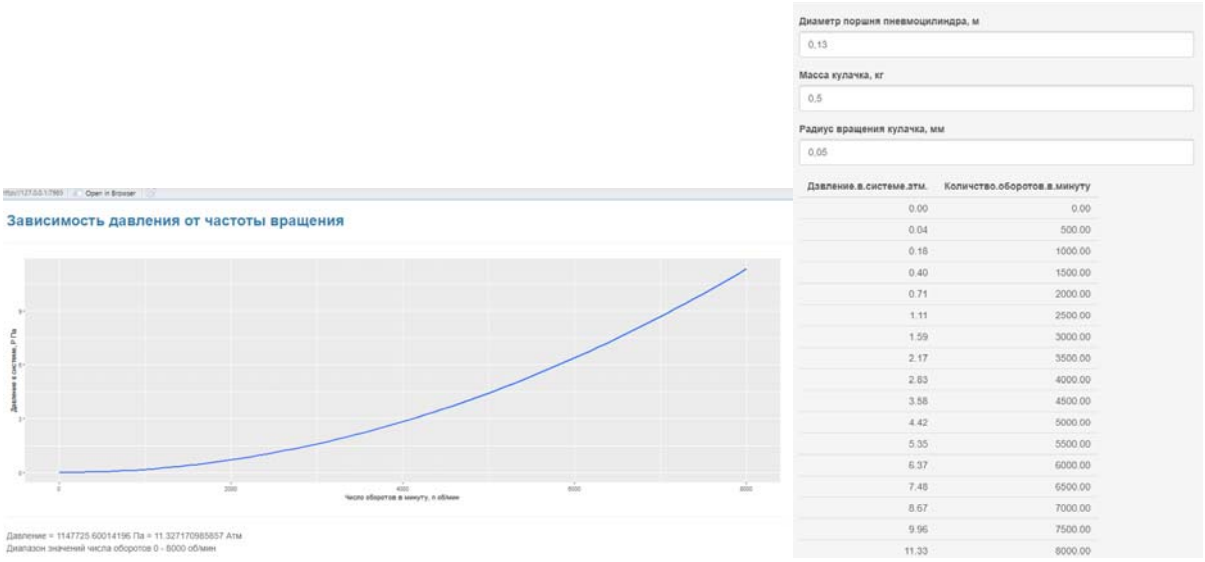


Рис. 3. Результат работы программы

Данная модель была реализована в виде программного продукта на языке R. Результат выводится в виде графика зависимости давления в системе от частоты вращения кулачка, а также таблицы соответствующих числовых значений. Образец рабочего окна программы показан на рис. 3. Для демонстрации работы программы были использованы параметры станка с системой пневмозажима, указанные в таблице.

Исходные параметры для расчетов

Наименование	Значение
Диаметр поршня пневмоцилиндра $D_п$, м	0,13
Масса кулачка m, кг	0,5
Радиус вращения кулачка R, м	0,05

Разработанная программа представляет собой средство визуализации режимов работы пневмопривода при его использовании для зажима заготовки в трехкулачковом патроне ГПТС с ЧПУ.

Заключение. Формирование математической модели, связывающей усилия зажима заготовки с управляющим воздействием на пропорциональном регуляторе давления, является важным этапом проектирования зажимного устройства прецизионного токарного станка с ЧПУ. Разработанная модель учитывает такие факторы как давление в пневмосистеме, размеры заготовок, усилия зажима и частоту вращения патрона. Модель дает представление о динамических процессах, происходящих при использовании пропорционального регулятора давления для контроля усилия зажима заготовки.

Список литературы

1. Клепиков В. В., Солдатов В. Ф. Проектирование технологической оснастки: Учебно-методическое пособие. М.: МГИУ, 2008. 128 с.

2. Исаев А. В., Козочкин М. П., Купцов В. Р. Особенности встречного и попутного фрезерования при обработке тонкостенных деталей // Вестник МГТУ «Станкин». Научный рецензируемый журнал. М.: МГТУ «Станкин». №1 (24). 2013. С. 11—17.

3. Исаев А.В., Козочкин М.П. Применение информационно-измерительной системы для повышения точности обработки тонкостенных деталей на фрезерных станках с ЧПУ // Измерительная техника. №10. 2013. С. 42-46.

4. Исаев А.В., Лядник С.В., Широков А.А. и др. Анализ конструкций приводных инструментальных блоков для прецизионных токарных станков с ЧПУ // Вестник МГТУ «Станкин». № 4 (63). 2022. С. 75-80.

5. Исаев А. В., Лядник С.В., Широков А.А. и др. Анализ конструкций модульных несущих систем прецизионных токарных станков с ЧПУ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 4. С. 501-506.

6. Баринов А. В., Платонов А. В., Токарев В. А. и др. Исследование качества обработки деталей на универсальных токарных станках // Проблемы современной науки и образования. № 8 (50). 2016. С. 39–43.

7. SCHUNK: базирование и закрепление тонкостенных деталей [Электронный ресурс]. URL: https://konstruktions.ru/podrobnee-det/bazirovanie-i-zakreplenie-tonkostennyx-detalej.html?ysclid=lj1mtmk39t243771118 (дата обращения: 25.10.2023).

8. Королёв В.А., Стажков С.М. Расчёт пневматического привода с релейным управлением. Санкт-Петербург: БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2019. 35 с.

Купцов Владимир Романович, генеральный директор, vrk@stankorus.ru, Россия, Москва, ООО «Станкорус»,

Лядник Сергей Владимирович, старший преподаватель, lyadnik@gmail.com, Россия, Москва, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,

Исаев Александр Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, avisz@yandex.ru, Россия, Москва, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

MATHEMATICAL MODEL OF CLAMPING DEVICE FOR PRECISION LATHE ON THE BASIS OF PROPORTIONAL PRESSURE REGULATOR

V.R. Kuptsov, S.V. Lyadnik, A.V. Isaev

The article describes one of the stages of solving the complex problem of development and research of the original system used for pneumatic fixturing of the workpiece on the precision lathe with numerical control basing on pneumatic electronic regulator. As a result of mathematical modeling the optimal parameters of the regulator are determined, which allows to minimize the deformation of the workpiece during clamping, thereby increasing the quality and productivity of turning operation.

Key words: pneumatic clamping devices, electronic proportional pressure regulator, mathematical modeling, metalworking machine tools.

Kuptsov Vladimir Romanovich, general director, vrk@stankorus.ru, Russia, Moscow, Stankorus LLC,

Lyadnik Sergey Vladimirovich, senior lecturer, lyadnik@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow State University of Technology «STANKIN»,

Isaev Aleksandr Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, avisz@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow State University of Technology «STANKIN»

УДК 621
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-425-426

ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИМЕНЯЕМОГО ПРИ ШЕВИНГОВАНИИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

А.О. Чечуга

В работе рассмотрены основные виды оборудования применяемого в процессе шевингования зубчатых колёс различного диаметра. Описаны их разновидности и конструктивные особенности. Изложены принципы и методы обработки зубчатых колёс на шевинговальных станках различного типа. Представлен поэтапный процесс наладки шевинговального станка. Приведены способы контроля параметров зубчатых колёс, а также особенности применения контрольного инструмента.

Ключевые слова: шевингование, шевер, метод взаимной обкатки, штангензубомер, эвольвентомер.

Шевинговальные станки служат для окончательной обработки незакаленных зубчатых колёс, имеющих как косые, так и прямые зубья. Также, колёса могут иметь два типа зацепления: внутреннее и наружное. Шевинговальные станки позволяют обеспечить соответствие технологических параметров изготавливаемого изделия для зубчатых колёс различных размеров и количества зубьев.

Данные станки подразделяются по способу расположения осей обрабатываемой детали и шевера: горизонтальным и вертикальным. Горизонтальные станки является более распространённым видом, поскольку обладают конструктивными и функциональными преимуществами [1].

В свою очередь, горизонтальные шевинговальные станки изготавливаются двух типов:

- с задним расположением головки;
- с верхним расположением головки.

При заднем расположении головка поворачивается для создания угла скрещивания относительно вертикальной оси, пересекающей ось центров бабок колеса. При заднем расположении угол скрещивания образуется относительно горизонтальной оси.

Радиальная подача у станков с верхним расположением шевинговальной головки осуществляется с помощью подъема консоли, на которой располагаются направляющие стола. У станков с задним расположением радиальная подача обеспечивается поперечным перемещением стойки. Для обоих типов станков продольная подача стола происходит вдоль оси центров бабок.

Шевер всегда располагается на шпинделе, поддерживаемом съемным подшипником. В зависимости от размера колеса и особенностей оборудования, шевер в зацеплении, в процессе обработки, может являться как ведущим, так и ведомым [2].

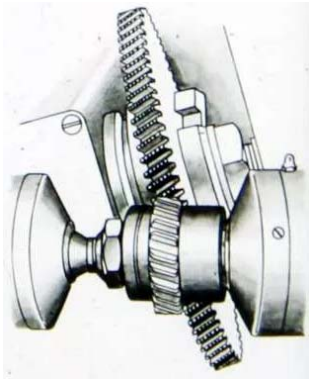


Рис. 1. Процесс шевингования зубчатого колеса

Станки с верхним расположением головки оснащаются поворотными плитами с местами крепления центровых бабок. При заднем расположении используются клиновые плиты, наклоняющие главную ось центровых бабок относительно осей направляющих стола. Поворот оси центровых бабок позволяет производить как тангенциальное, так и шевингование методом “короткого хода”.

Рассмотрим более подробно особенности шевинговальных станков с горизонтальным и вертикальным расположением осей.

Горизонтальное расположение осей позволяет производить обработку зубчатых колёс с прямыми и косыми зубьями, наружного и внутреннего зацепления, при чем, для обработки детали с внутренним зацеплением используют специальную бабку и головку [3].

Такие станки осуществляют обработку по методу взаимной обкатки шевера и колеса при пересекающихся осях. Ведущим элементом является шевер. Скрещивание осей инструмента и заготовки обеспечивает продольное скольжение между зубьями, которое, при давлении, позволяет срезать слой металла с зубьев колеса [4]. При движении заготовки вдоль оси происходит обработка по всей поверхности зуба за несколько рабочих ходов. Каждый двойной ход заканчивается радиальной подачей заготовки. По окончанию обработки стол совершает несколько калибрующих ходов без радиальной подачи. Определение количества как калибрующих, так и рабочих ходов устанавливается в соответствии с технологическими требованиями к обработке при наладке станка.

Станки с вертикальным расположением осей шевера и заготовки имеют три рабочих движения [5]:

1.Вращение, при котором шевер является ведомым элементом, а колесо ведущим.

2.Осевая подача – движение шевера.

3.Радиальная подача, осуществляющаяся периодически после каждого вертикального хода.

Принцип работы станка заключается в следующем: введенное в зацепление с шевером колесо сообщает движение вращения инструменту, который постепенно опускается вместе с суппортом, по мере процесса обработки, до тех пор, пока не выйдет из зацепления на две трети своей ширины. После чего включается реверсивное вращение, и шевер перемещается на величину длины радиальной подачи. Процесс будет происходить до тех пор, пока шевер не достигнет установленной глубины. По окончанию обработки производится несколько калибрующих ходов [6].

Процесс наладки шевинговальных станков состоит из следующих этапов:

1. Выбор инструмента. Основным критерием подбора подходящего для обработки шевера является количество его зубьев, которое не должно иметь общего множителя с числом зубьев колеса [7].

2. Проверка биения. После установки шевера необходимо произвести проверку, при которой величина его биения не должна превышать 8 микрон.

3. Установка угла шевинговальной головки. Поворотом головки необходимо обеспечить угол, при котором соблюдается скрещивание осей инструмента и заготовки. Для определения правильной величины угла можно использовать характеристику пятна контакта, при которой по всей длине зубьев колеса должен оставаться равномерный отпечаток шевера.

4. Установка колеса в станке. Как правило, осуществляется с помощью оправки в центрах.

5. Определение и установка величины длины хода стола. Расстояние крайних точек определяется шириной колеса.

6. Определение расстояния между осями. Оси колеса и шевера должны находиться на расстоянии равном сумме радиусов их начальных окружностей.

7. Установка скоростей обработки и подачи. Число оборотов выбирается на основании типа обрабатываемой детали, ее материала и размера зубьев.

Контроль параметров изготовленных зубчатых колёс шевингованием может осуществляться по двум методам:

- проверки отдельных элементов;
- комплексной проверки, при которой одновременно проверяется несколько параметров колеса.

Выбор метода зависит от степени точности, типа производства, а также размера колёс. При крупносерийном производстве применяют комплексные методы проверки.

Контролю подвергаются следующие характеристики: биение окружности, шаг колеса, толщина и высота зубьев, профиль зубьев, длина нормали, уровень шума при работе.

Биение колеса проверяется с помощью индикатора с наконечником, который фиксирует значения высоты ролика при каждом вращении. Разница наибольшего и наименьшего значений индикатора определяют максимальную величину биения.

Толщина зубьев контролируется с помощью штангензубомеров или лазерных и оптических зубомеров. Штангензубомер имеет горизонтальную и вертикальную линейки, позволяющие измерять ширину и высоту тела зуба.

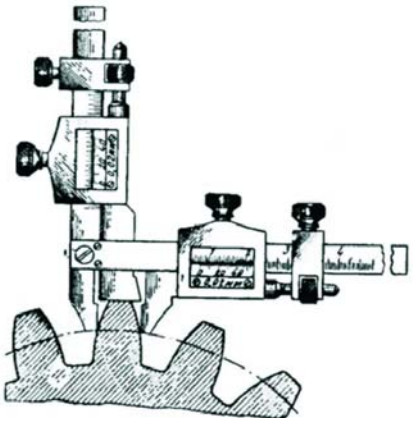


Рис. 2. Применение штангензубомера для измерения зубьев колеса

Для проверки шага зубьев применяют шагомеры различных конфигураций, позволяющие определить отклонения от номинальных значений основного шага зубьев колеса. В зависимости от модуля зубьев применяют разные типы устройств: 3…15 мм, 8…26 мм, 20…30 мм. Длина шага равна расстоянию между опорами шагомера, устанавливающимися на точках, близких к делительной окружности. Погрешность измерений будет зависеть от формы выступов и биения колеса.

Профиль зубьев проверяют с помощью эвольвентомеров. Данные приборы оснащены наконечником, показания которого, при проверке, остаются неизменными при соответствии эвольвенты установленной [8].

Проверку длины общей нормали осуществляют с помощью измерительных скоб, индикаторными и микрометрическими приборами. По колебаниям длины нормали колеса можно судить о кинематической точности зуборезного оборудования.

Задачей комплексного контроля является выявление отклонений изготовленного колеса от поставленных требований. Такие параметры как погрешность профиля, толщина зубьев, величина шага и биение определяют сумму дефектов проверяемой детали.

Для комплексной проверки используют прибор, в котором изготовленное колесо входит в зацепление с измерительным, после чего ему сообщается вращение. Группа датчиков отслеживает процесс работы, после чего фиксируются результаты.

Также, измеряется размер и точность пятна контакта. Этот показатель определяет надежность и долговечность работы колеса. Для измерения пятна контакта применяют красящий состав, наносимый на зубья измерительного колеса. При работе в зацеплении остаются следы на зубьях тестируемого колеса, которые и определяют пятно контакта.

Плавность работы колеса можно оценить по уровню создаваемого шума в процессе тестирования. Чем выше качество поверхности зубьев, тем ниже уровень создаваемого шума. Для снижения уровня шума необходимо повысить точность процесса формообразования, или произвести дополнительную обработку поверхностей.

Список литературы

1. Козлов Д.Н. Шевингование. Учебное пособие для индивидуальной и бригадной подготовки рабочих на производстве. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: «Высш. школа», 1967. 144 с.

2. Родин П.Р. Технология изготовления зуборезного инструмента. К.: Техника, 1982. 208 с.

3. Болтовская Т.П., Болтовский И.А. Справочник по корригированию зубчатых колес. М.: Машиностроение, 1967. 240 с.

4. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.

5. Тайц Б.А. Производство зубчатых колес. Справочник. Машгиз, 1963. 684 с.

6. Козлов Д.Н. Шевинговальщик. Профтехиздат, 1962. 146 с.

7. Маликов А.А. Основы высокоэффективной технологии обработки зубьев цилиндрических колёс: монография. Тула: Изд-во ТулГ, 2008. 271 с.

8. Болтовский И.А. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых передач: справочник. М.: Машиностроение, 1986. 448 с.

Чечуга Антон Олегович, аспирант, chechugaanton@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

FEATURES OF EQUIPMENT USED IN SCHEVING GEARS

A.O. Chechuga

The work discusses the main types of equipment used in the process of shaving gears of various diameters. Their varieties and design features are described. The principles and methods of processing gears on shaving machines of various types are outlined. A step-by-step process for setting up a shaving machine is presented. Methods for monitoring the parameters of gear wheels are presented, as well as features of the use of a control tool.

Key words: shaving, shaver, method of mutual running, caliper, involute gauge.

Chechuga Anton Olegovich, postgraduate, chechugaanton@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 629.4.02 + 06
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-427-428

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК НА РЕЗЬБОБРАБАТЫВАЮЩИХ И ШЛИЦЕФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

А.Е. Набоков

На станках фрезерной группы выполняются различные операции по обработки металлических заготовок торцевыми, концевыми, пазовыми, цилиндрическими фрезами. С использованием режущих инструментов и приспособлений выполняются операции для нарезания резьб. Одним из основных источников шума и вибрации, превышающим санитарные нормы и оказывающих негативное влияние на работников, является система «режущий инструмент – обрабатываемая заготовка». В статье приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей формирования спектров вибраций на рабочих местах станочников в нормируемом диапазоне звуковых частот при работе на станках моделей 5991, 5993, 5994, 5Б63, 5Б64, и 5Б65 и основных элементах виброакустической системы обследуемых станков в условиях реальной эксплуатации.

Ключевые слова: шлицефрезерные станки, резьбообрабатывающие станки, спектры вибраций, обработка заготовок.

Цель экспериментальных исследований спектров вибраций элементов общей колебательной системы резьбо- и шлицефрезерных станков заключалась в косвенной идентификации вклада интенсивности звукового излучения отдельных источников в формировании акустических характеристик в зоне проведения технологического процесса обработки заготовок [1,2]. Необходимость проведения измерений спектров вибраций объясняется следующими обстоятельствами. При измерении спектров шума фиксируются октавные уровни звукового давления всех источников шума, одновременно излучающих звуковую энергию. В этом случае выделить количественный вклад каждого источника и, соответственно, ранжировать их по степени интенсивности создаваемых уровней шума практически невозможно. При измерениях вибраций пьезоакселерометр устанавливается на конкретную колеблющуюся поверхность [3-5]. Сравнение октавных спектров шума и спектров вибраций в нормируемом частотном диапазоне звуковых частот и позволяет косвенно ранжировать источники акустического излучения по степени влияния на формирование звукового поля в зоне проведения технологического процесса обработки. Следует отметить, что измерялись октавные уровни вибрации в диапазоне частот 31,5 – 8000 Гц.

Объект и методы исследования. Цель проведения экспериментальных исследований вибраций в нормируемом диапазоне звуковых частот в зоне проведения технологического процесса обработки заготовок на станках моделей 5991, 5993, 5994, 5Б63, 5Б64, и 5Б65 в условиях реальной их эксплуатации на предприятиях РЭРЗ – филиал ОАО «Желдорреммаш» и ПАО «Роствертол» заключалась в анализе закономерностей формирования спектров вибраций не только в зоне проведения технологического процесса обработки, но и основных элементах виброакустической системы обследуемых станков [5-7].

Экспериментальные измерения проводились с применением аппаратуры аккредитованного на проведение подобных испытаний НПЦ «Охрана труда» ОНИИЦ НИЧ ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» измерительного комплекса «ОКТАВА-110А», «ОКТАВА-101ВМ» и «Ассистент».

При обработке коротких заготовок на станках моделей 5991, 5993, 5994, 5Б63, 5Б64, и 5Б65 установлено, что спектр вибраций имеет высокочастотный характер (рис. 1).

Максимальные уровни вибраций сосредоточены в седьмой – девятой октавах.

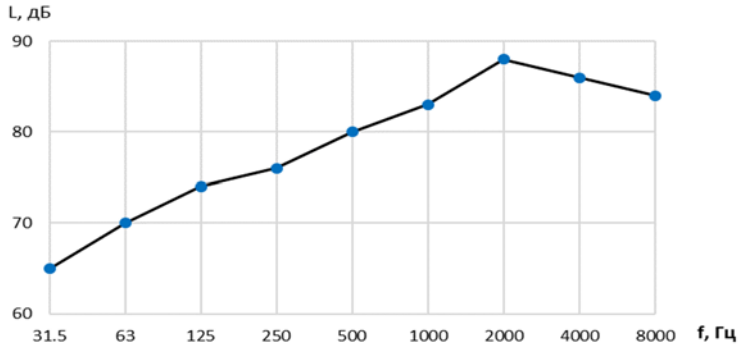


Рис. 1. Спектр вибраций на коротких заготовках

Наиболее высокие уровни вибраций зафиксированы на корпусе фрезерных бабок станков 5Б63 (рис. 2).

Уровни вибраций на корпусе фрезерной бабки станка модели 5Б63 достигают 87 дБ, у станка моделей 5Б64 и 5Б65 – 83 дБ, а у станка 5993 – 78 дБ.

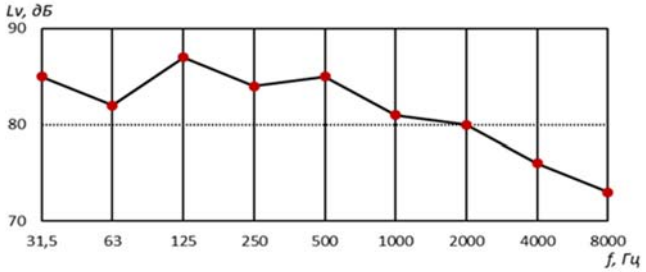


Рис. 2. Спектры вибраций на корпусах фрезерных бабок станков моделей 5Б63, 5Б64, 5933

Уровни вибраций бабок изделий на вышеуказанных станках не превышают 72 – 73 дБ. (рис. 3).

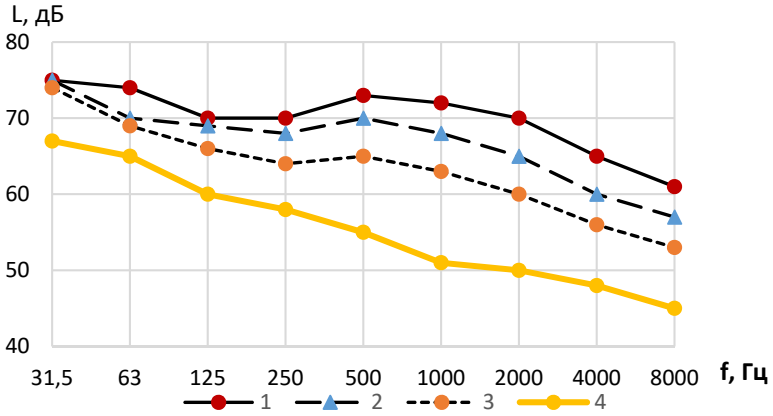


Рис. 3. Спектры вибраций бабок изделий: 1 – станка модели 5Б64; 2 – станков моделей 5Б63; 3 – станка модели 5993; 4 – на станине станка 5Б65

При работе станка модели 5Б63 уровни вибраций на бабке изделия на 10 – 14 дБ ниже, чем на фрезерной бабке. Аналогичные результаты получены и у остальных станков. Следует отметить низкие уровни вибрации, в особенности, в диапазоне 500 – 8000 Гц (т.е. в котором уровни звукового давления превышают санитарные нормы).

При фрезеровании шлицов доминирующее влияние оказывают обрабатываемая заготовка и узел фрезерования (рис. 4).

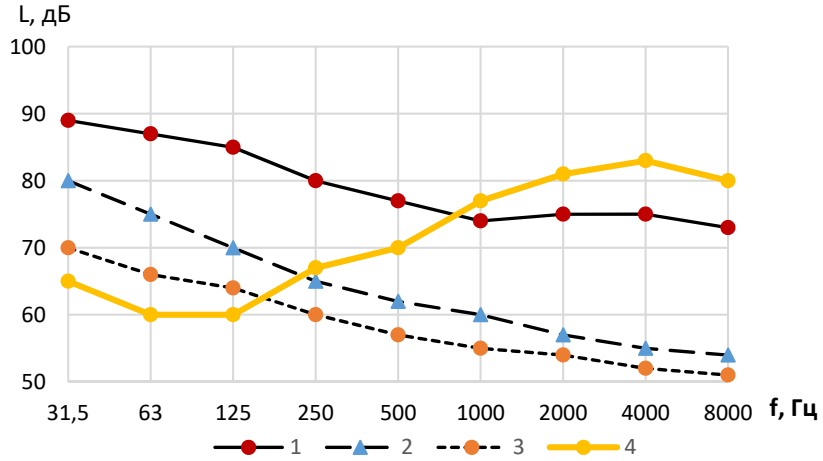


Рис. 4. Спектры вибраций шлицефрезерного станка: 1 – на заготовке; 2 – на столе; 3 – на станине; 4 – на нижней опоре оправки фрезы

Спектр вибраций узла фрезерования имеет четко выраженный высокочастотный характер, т.к. наиболее высокие уровни вибраций достигают значений 83 дБ в седьмой – девятой октавах. Спектр вибраций заготовки – средне и высокочастотный. Стол и станина практически не влияют на уровни шума на рабочих местах станочников. Аналогичный характер имеют спектры вибраций токарного резьбонарезного станка 1622 (рис. 5).

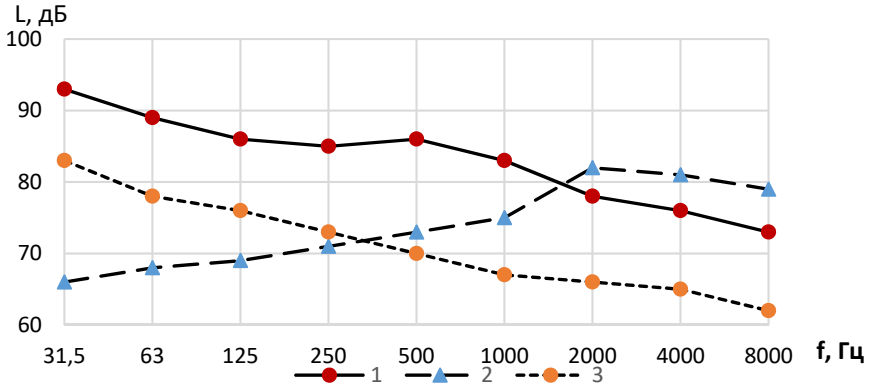


Рис. 5. Спектры вибраций токарного резьбонарезного станка: 1 – на заготовке; 2 – на резце; 3 – на шпиндельной бабке

Заключение. Резец как консольно закреплённая деталь имеет высокочастотный состав спектра вибраций. Широкополосный спектр с близким к равномерному закону распределения вибраций в интервале 250 – 2000 Гц имеет обрабатываемая заготовка [7,8]. Аналогично вышеуказанным станкам у токарного резьбонарезного станка спектр вибраций шпиндельной бабки низкий и среднечастотный и вследствие низких частот вращения шумообразованием на рабочем месте станочника можно пренебречь. Таким образом, экспериментальные исследования вибраций подтвердили правильность выбора доминирующих источников шума резьбообрабатывающих и шлицефрезерных станков.

Список литературы

1. Чукарин, А.Н. Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки / А. Н. Чукарин // Федер. агентство по образованию, ГОУ ВПО Дон. гос. техн. ун-т. Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2005. 151 с. EDN QNAZWX.

2. Чукарин, А. Н. Влияние процессов резания на шум фрезерных станков / И. А. Балыков, А. Н. Чукарин, Д. З. Евсеев // Новое в безопасности и жизнедеятельности и экологии: Сб. ст. докл. конф. 14-16 окт. Санкт-Петербург, 1996. С. 222-223.

3. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / И. Г. Переверзев, Т. А. Финоченко, И. А. Яицков [и др.]; ФГБОУ ВО РГУПС. Ростов-на-Дону, 2019. 308 с.

4. Theoretical research studies of regularities formation of acoustic characteristics for threading and spline shaft milling machine / A.E. Набоков, И.А. Яицков, А.Н. Чукарин // AKUSTIKA, ISSN 1801-9064, Studio D – Akustika s.r.o., České Budějovice, 2021, VOLUME 41. P. 189-194. DOI: 10.36336/akustika 202141189.

5. Методика и техническое обеспечение проведения экспериментальных исследований по определению шума на рабочих местах / Т.А. Финоченко, М.В. Баланова, И.А. Яицков // Научно-технический журнал «Труды РГУПС». 2019. №1 (46). С.5-8.

6. Козлюк А.С., Финоченко В.А. Эмпирические исследования виброакустических воздействий на операторов выправочно-подбивочных машин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2019. № 4 (30). С. 104–107.

7. Набоков А.Е. Экспериментальные исследования шума на рабочих местах станочников резьбообрабатывающих и шлицефрезерных станков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 5. С. 77-84.

8. Finochenko T., Yizkov I, Dergacheva L. Risk Management in Transportation Safety System. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. Volume 2. P. 144-145. DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022050.

Набоков Александр Евгеньевич, старший преподаватель, mr.nae@yandex.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Ростовский государственный университет путей сообщения

RESEARCH OF VIBRATION WHEN PERFORMING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PROCESSING WORKPIECES ON THREAD-MAKING AND SPLIT-MILLING MACHINES IN MACHINERY ENGINEERING PRODUCTIONS

A.E. Nabokov

On the machines of the milling group, various operations were revealed for processing metal blanks with end, end, groove, cylindrical cutters. With the use of additional tools and the ability to customize the threading operation. One of the main sources of noise and vibration is the "required tool - perceived workpiece" system. The article presents the results of experimental studies of the patterns of formation of vibration spectra at the workplaces of machine operators in the normalized range of sound frequencies when working on machine tools of models 5991, 5993, 5994, 5B63, 5B64, and 5B65 and the main elements of the vibroacoustic system of the examined machines in real operation

Key words: slot milling machines, threading machines, vibration spectra, workpiece processing.

Nabokov Alexander Evgenievich, senior lecturer, mr.nae@yandex.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State Transport University

УДК 533.15; 620.1; 621.643
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-430-431

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.М. Волгин, А.А. Потапов, П.Э. Калиш, А.П. Малахо

Широкое применение уплотнений из полимерных и углеродных материалов требует точного определения комплекса физико-механических свойств, используемых при расчетах уплотняемых узлов. Настоящая работа посвящена анализу современной научно-технической литературы, посвященной теоретическому и экспериментальному исследованиям физико-механических свойств уплотнительных материалов.

Ключевые слова: уплотнительные материалы, физико-механические свойства, циклическое нагружение, экспериментальное исследование, аналитическая аппроксимация.

Надежная работа оборудования, находящегося под давлением рабочей среды, во многом определяется герметичностью его разъемных соединений [1 - 6]. Герметичность разъемных соединений зависит от большого числа факторов: особенностей конструкции, физико-механических свойств материалов сопрягаемых элементов, состояния уплотняющих поверхностей, давления и температуры уплотняемой среды и ее агрегатного состояния (газ или жидкость), качества изготовления, технического обслуживания и оснастки, необходимой для этого обслуживания и др.

Среди различных конструкций неподвижных разъемных соединений, наибольшее распространение получили фланцевые соединения, уплотнение которых достигается за счет обжатия плоской прокладки [1, 7, 8].

Довольно часто применяются прокладки из полимерных и углеродных материалов, которые обладают упруго-вязко-пластичными свойствами, что необходимо учитывать при определении условий обеспечения заданной степени герметичности фланцевых соединений. На рис. 1 представлены зависимости давления сжатия пластичных прокладок из разных материалов от величины их сжатия, которое определяется как разница исходной толщины прокладки и ее толщины под нагрузкой [10].

Восходящие части кривых соответствует нагружению прокладки давлением сжатия, а нисходящие части кривых соответствуют разгружению прокладки при уменьшении давления сжатия. Из рис. 1 хорошо видны основные особенности пластичных прокладок:

- нелинейная зависимость напряжений от перемещений (деформации);
- наличие пластических деформаций, в результате которых после снятия нагрузки толщина прокладки не восстанавливается до первоначального значения;
- существенное различие упругих свойств материала прокладки при нагружении и при разгружении прокладки.

В общем случае утечки уплотняемой среды через фланцевое соединение обусловлены двумя причинами:

- утечки по зазорам между контактирующими поверхностями фланцев и герметизирующей прокладки;
- утечки через поры в материале герметизирующей прокладки.

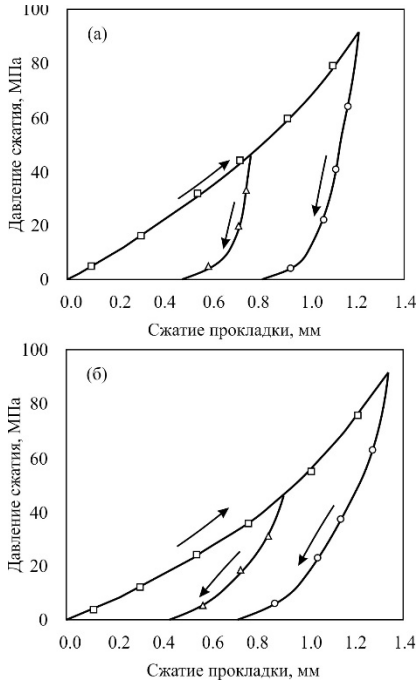


Рис. 1. Характеристики уплотнений из разных материалов: (а) графит; (б) фторопласт-4 [10]

Утечки по контактирующим поверхностям зависят от точности и качества поверхностей фланцев и свойств прокладки, а также от контактного давления между фланцем и поверхностью прокладки. В свою очередь контактное давление зависит от начального натяжения болтов и его ослабления в результате давления герметизирующей среды, внешних сил, действующих на фланцевое соединение, а также от изменения температуры. Минимальное контактное давление, обеспечивающее минимальные утечки по контактирующим поверхностям и прокладочный коэффициент указываются производителем прокладок, а порядок расчетов фланцевых соединений с использованием этих параметров регламентируется стандартами ГОСТ и ASME.

Утечки через герметизирующую прокладку зависят от ее геометрических размеров и пористости материала прокладки, которая зависит от величины сжимающих напряжений.

Таким образом, физико-механические характеристика материала герметизирующей прокладки являются критически важными при проектировании фланцевых соединений, так как они в значительной степени определяет поведение соединения и его герметичность.

Для определения физико-механических характеристик материалов, используемых в пластических прокладках применяются как теоретические, так и экспериментальные методы [11 – 18].

Теоретические методы в основном базируются на общих методах исследования структуры и физико-механических свойств дисперсных и композиционных материалов [11]. В частности, в рамках детерминированной модели уплотнения при условном выделении этапов структурного и пластического деформирования получены оценки влияния формы, размера и гранулометрического состава (структурных параметров) реальных порошковых материалов на процесс их уплотнения. Установлены зависимости прочности исследованных порошковых материалов при сжатии, растяжении и сдвиге от относительной плотности и их математические аппроксимации, экстраполированные па весь теоретически возможный интервал изменения плотности [12 – 13]. На основе анализа общих свойств предельных поверхностей разработана методика построения кривых предельного состояния, использующая результаты испытаний порошковых материалов различной плотности для частных схем нагружения. Построены кривые предельного состояния порошковых материалов, представленные в виде номограмм для определенных интервалов плотностей. Установлены области, соответствующие условиям уплотнения и разрыхления (разрушения) исследованных порошковых материалов для произвольных схем нагружения [13].

При определении зависимости физико-механических свойств пористых материалов от приложенного давления сжатия используются методы микромеханического моделирования консолидации и уплотнения [15, 19 – 21]. В процессе уплотнения, если давление загрузки увеличивается равномерно, порошковая сборка проходит три стадии. Прежде всего, частицы заполняют пустоты и устанавливают контакты с соседними частицами. Эта стадия называется стадией перегруппировки. После установки большинства контактов начинается первоначальное уплотнение. Происходит упругая деформация и пластическая деформация, и давление нагрузки резко возрастает. Третья стадия - это разрушение, когда частицы распадаются на фрагменты. Для численного моделирования консолидации и уплотнения используется метод дискретных элементов (МДЭ) - это численная модель, способная отслеживать движение и взаимодействие отдельных моделируемых частиц. МДЭ расширил наше понимание гранулированной системы, производя количественные прогнозы, а не только качественное описание, расширил наше понимание агрегатов частиц, предоставляя как микроскопическую, так и макроскопическую информацию. Доказано, что МДЭ обладает большим потенциалом в научных задачах и отраслях промышленности, включая химическое и машиностроительное производство, пищевую промышленность, геонауки и сельское хозяйство [18]. Поступательное и вращательное движение каждой частицы может быть рассчитано с помощью второго закона движения Ньютона. Силы взаимодействия частиц обычно представляют собой силы тяжести и силы межчастичного контакта, включая нормальную и тангенциальную силы, также учитываются сила Ван-дер-Ваальса и капиллярная сила для системы мелких и влажных частиц соответственно. Для определения сил для конкретных материалов часто необходимо использовать

экспериментальные данные. В настоящее время применение МДЭ для моделирования поведения терморасширенного графита и других пористых уплотнительных материалов весьма затруднено в связи со сложной структурой частиц материала.

Для учета нелинейной зависимости напряжения сжатия от деформации используются различные макроскопические модели нелинейной упругости и пластичности [12, 16, 22]. Для учета гистерезиса в зависимости напряжение-деформация используется модель Прейзаха-Майергойза (Preisach-Mayergoyz), которая базируется на дискретно деформируемом элементе, обладающим гистерезисом [23 - 26]. Недавно было предложено обобщение этой модели с учета пластических деформаций [27].

Довольно широко используются различные феноменологические модели нелинейной упругости и пластичности. Так в работе [28] с использованием модифицированных моделей Муни-Ривлина и Огдена, учитывающих повреждаемость материала при деформации, получены зависимости напряжения от толщины образца при сжатии образца из резиноподобного материала, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. Использование феноменологических моделей позволяет, учитывающих особенности поведения пористых материалов, позволяет использовать для прогнозирования свойств таких материалов модели сплошных сред. В связи с этим в этом направлении проводятся интенсивные исследования с целью разработки наиболее общих моделей [29 - 31].

Учитывая, что, как правило, толщина прокладок существенно меньше их диаметра и ширины, и в процессе эксплуатации на прокладки в основном действую сжимающие напряжения, то, можно приближенно считать, что прокладки работают в условиях одноосного сжатия. Аналогичные условия реализуются при уплотнении гранулированных и пористых материалов при прокатке. Теория уплотнения гранулированных материалов прокаткой достаточно хорошо разработана и позволяет определить как основные параметры процесса, так и характеристики уплотненного материала [32 – 37]. Для повышения точности используются эмпирические зависимости предела текучести от плотности материала [36] и феноменологические модели. Так в работе [38] использована зависящая от плотности модель Друкера-Прагера с верхним пределом. В этой модели поверхность текучести включает в себя три сегмента: поверхность разрушения при сдвиге, обеспечивающую преимущественно сдвигающий поток, ‘колпачок”, обеспечивающий механизм неупругого упрочнения для представления пластического уплотнения, и переходную область между этими сегментами, введенную для обеспечения гладкой поверхности исключительно для облегчения численной реализации. Кроме того, для описания поведения при разгрузке был использован нелинейный закон упругости. Параметры упругости (объемный модуль и модуль сдвига) были выражены как функции относительной плотности и уровня напряжений. Использование этой феноменологической модели при численном моделировании процесса компактирования методом конечных элементов позволило получить результаты, хорошо согласующиеся в экспериментальными данными.

Для учета влияния пористости на упругие свойства уплотняющих материалов используются и более простые модели, которые в ряде случаев, позволяют получить удовлетворительные результаты. Так в работах [39 – 41] предлагается определять модуль упругости пористого материала по значению модуля упругости сплошного материала, умноженного на коэффициент K, зависящий, как значения пористости, так и от геометрии пор. Выражения для коэффициента K могут быть заданы эмпирическими формулами [39], параметры которых определяются по экспериментальным данным, а так же получены на основании анализа напряженно-деформированного состояния представительного объема материала (по аналогии с моделями микромеханики композиционных материалов) [40, 41]. Однако, использование простых моделей не позволяет в полной мере учесть особенности деформирования уплотнительных материалов, так как не учитывает существенные отличия значений модулей упругости при нагружении (сжатии) и разгружении. Поэтому применение таких моделей для анализа герметичности фланцевых соединений весьма ограниченно.

Различие механических свойств пористых материалов при нагружении и разгрузке связывают с наличием линейно-упругой деформации и неупругой деформации [42]. Источниками неупругой деформации являются: (1) закрытие ранее существовавших трещин, (2) скольжение ранее существовавших трещин, (3) дилатансия, вызванная возникновением и распространением трещины, и (4) уплотнение, вызванное разрушением пор/пустот. В результате нагружения модуль упругости монотонно увеличивается, при этом в каждом цикле разгрузки модуль упругости существенно больше, чем модуль упругости при нагружении.

В настоящее время, несмотря на большой объем теоретических и экспериментальных исследований не существует единой канонической теории физико-механических свойств пористых, дисперсных и композиционных материалов, поэтому необходимо рассматривать и учитывать особенности структур и свойств отдельных материалов.

Методы определения свойств уплотняющих материалов регламентируются соответствующими стандартами [50 – 53]. В ГОСТ 33784-2016 [50] описана процедура определения сжимаемости и восстанавливаемости образца, предусматривающая предварительное сжатие образца, изменение толщины образца P при предварительной нагрузке, увеличение сжимающей нагрузки до основного значения, выдержка образца при основной нагрузке 60 с и измерение толщины образца под нагрузкой M, уменьшение нагрузки до предварительной, выдержка 60 с и измерение толщины образца после снятия основной нагрузки R. Сжимаемость $E_С$ и $E_В$ восстанавливаемость образца определяются по следующим соотношениям:

$$E_С = 100\ (P-(M+K)/P; \quad E_В = 100\ (R-(M+K)/(P-(M+K))$$

где K – величина собственной деформации прибора при общей нагрузке без образца.

Значения предварительной и основной нагрузки регламентируются стандартом [50]. Значения $E_С$ и $E_В$ характеризуют механические свойства материала прокладки, однако недостаточны для оценки герметичности фланцевого соединения. ГОСТ 34708-2021 [51] предусматривает более детальную процедуру определения механических свойств прокладок из ТРГ, которая во многом совпадает с требованиями стандартов EN 13555:2014 [52] и DIN 28090-2-2014 [53]. На рис. 2 представлена тестовая процедура, предусматривающая периодическое сжимающее нагружение и последующую разгрузку с увеличивающейся амплитудой. Под действием нагрузки прокладка упруго-пластически деформируется на этапе нагружения и упруго восстанавливается на этапе разгрузки (рис. 3). Используя информацию, полученную в ходе испытаний можно определить, как сжимаемость и восстанавливаемость прокладки, так и модуль упругости (рис. 3 в) и использованием следующего соотношения:

$$E_{\mathrm{G}} = \frac{2}{3} Q_{\mathrm{A}} \times \frac{e_{Q_{\mathrm{A}}}}{\Delta e_{\mathrm{G}}}.$$

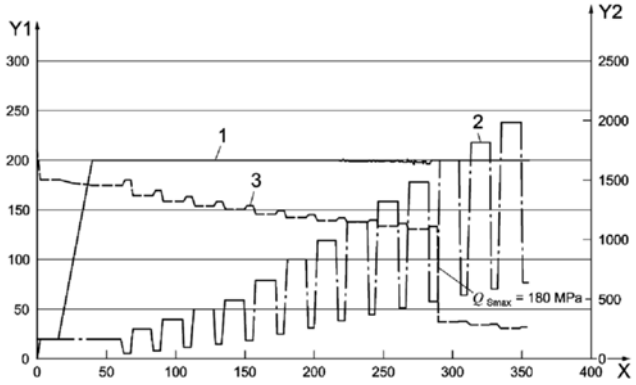


Рис. 2. Тестовая процедура для определения нагрузки, при которой прокладка разрушается Q_{smax}, и модуля упругости прокладки E_G: 1-температура [°C]; 2-поверхностное давление прокладки [МПа]; 3-толщина прокладки [мкм]; X-время [мин]; Y1-температура [°C]; Y2- толщина прокладки [мкм] [52]

Основное отличие DIN 28090-2-2014 [53] от EN 13555:2014 [52] при определении модуля упругости прокладки состоит в том, что в расчетное соотношение входит не толщина прокладки в конце цикла нагружения $e_{Q_{\mathrm{A}}}$, а начальная толщина прокладки e. В связи с этим значения модуля упругости прокладки E_{G} определенные по [52] и по [53] будут отличаться в $e_{Q_{\mathrm{A}}}/e$ раз.

Существуют и другие методы определения модуля упругости пористых материалов. В работе [54] предложен метод так называемого «касательного модуля упругости». В этом методе образцы подвергались двукратному одноосному сжатию до заданного уровня напряжений. Значение напряжения в точке изгиба в первом цикле нагружения кривой модуля касательного напряжения рассматривается как нормальная составляющая напряжения (рис. 4). Изменение модуля упругости в точке С объясняется схлопыванием пор и микротрещин.

Международное общество механики горных пород рекомендует три стандартных метода определения модулю упругости [55]:

- касательный модуль упругости E_{tan} определяется как наклон линии, касательной к кривой напряжение-деформация, при фиксированном проценте от предела прочности (рис. 5а);
- средний модуль упругости E_{av} определяется как наклон прямолинейной части кривой напряжение-деформация (рис. 5б);
- секущий модуль упругости E_{sec} определяется как наклон линии от начала координат (обычно точки (0;0)) до некоторого фиксированного процента предельной прочности, обычно 50% (рис. 5в).

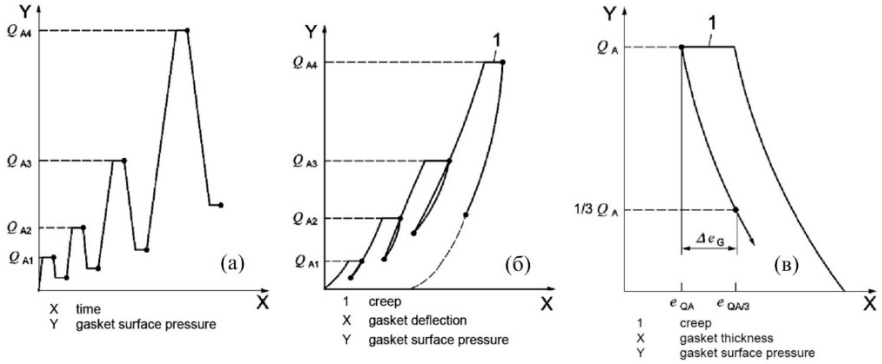


Рис. 3. Схема нагружения-разгрузки (а), кривая деформирования прокладки (б) и схема определения модуля упругости (в) [52]

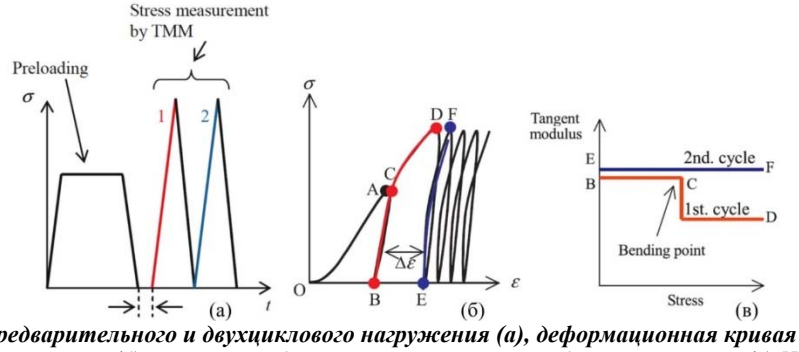


Рис. 4. Схема предварительного и двухциклового нагружения (а), деформационная кривая на двух циклов нагружения (б) и схема определения «касательного модуля упругости» (в) [54]

В ряде систем инженерного анализа (СИА) методом конечных элементов имеются встроенные возможности учета особенностей деформирования материалов герметизирующих прокладок при нагружении и при разгружении. Например, в системе Ansys имеется специальный модуль Gasket [56], позволяющий использовать экспериментальные данные для задания как для кривой нагружения, так и для кривых разгружения (рис. 6).

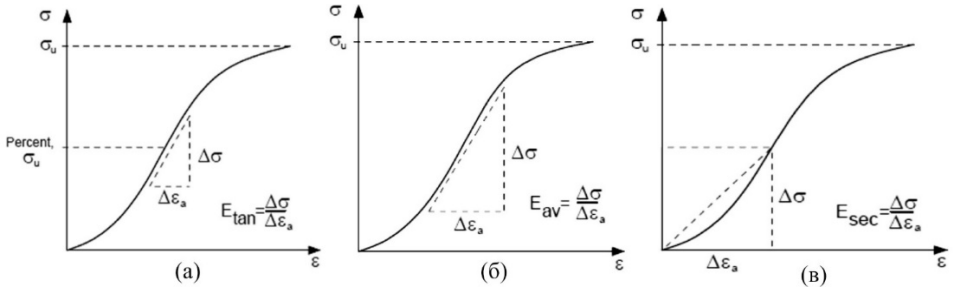


Рис. 5. Схема определения касательного (а), среднего (б) и секущего (в) модуля упругости [55]

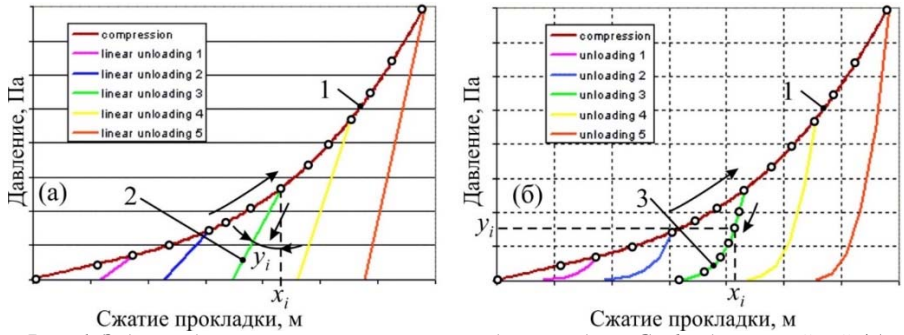


Рис. 6. Задание данных о материале прокладки в модуле Gasket для линейной (а) и нелинейной (б) аппроксимации кривых разгружения: (1) кривая нагружения; (2) линейная аппроксимация кривой разгружения; (3) нелинейная аппроксимация кривой разгружения [56]

При этом кривая нагружения задается набором пар значений (сжатие прокладки-давление), а кривые разгружения задаются по-разному в зависимости от вида аппроксимации. При линейной аппроксимации кривая разгружения задается величиной сжатия прокладки в начале этапа разгружения и наклоном аппроксимирующей прямой (рис. 6а). При нелинейной аппроксимации кривая разгружения задается так же, как и кривая нагружения – набором пар значений (сжатие прокладки-давление).

Исходные данные всегда содержат конечное количество точек на кривой нагружения и кривых разгружения, которые в общем случае отличаются от условий в рабочих условий фланцевого соединения. В этом случае для получения необходимой информации могут быть использованы методы интерполяции экспериментальных данных. В работе [57] описана процедура кригинг-интерполяции кривых нагружения и кривых разгружения, позволяющая получить данные о кривых разгружения при произвольном сжатии прокладки в начале этапа разгружения (рис. 7).

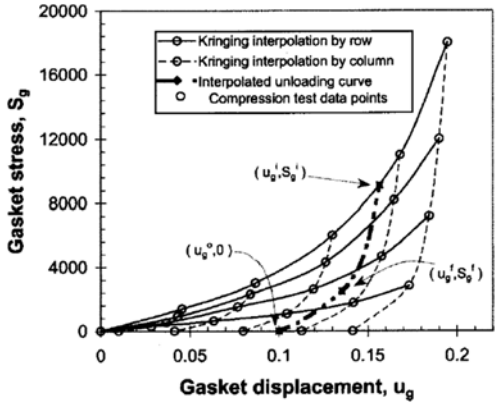


Рис. 7. Кригинг-интерполяция нелинейных данных для получения произвольной кривой разгружения (u_g', S_g') [57]

Таким образом, современные СИА позволяют широкие возможности учета особенностей физико-механических свойств материалов уплотняющих прокладок, так что и в этом случае основная проблема при анализе герметичности фланцевых соединений с прокладками из графитовой фольги состоит в отсутствии надежной и достоверной информации о свойствах материала.

Работа была выполнена в рамках государственного задания по молодежной лаборатории. Тематика: Исследование газопроницаемости и физико-химических свойств уплотнительных композиционных и углеродных материалов (FEWG-2021-0014).

Список литературы

1. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер. М.: Машиностроение. 1986. 464 с.

2. Bickford J. An introduction to the design and behavior of bolted joints. CRC press: Boca Raton. 1995.

3. Погодин, В.К. Разъемные соединения и герметизация в оборудовании высокого давления / В.К. Погодин. – Иркутск, 2001. – 406 с.

4. Божко Г.В. Разъемные герметичные соединения. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. 16(2), 404-420.

5. Продан В.Д. Божко Г.В. Герметичность оборудования / М.: Университет машиностроения. 2014. 109 с.

6. Кушнир А.П., Асадова Ю.С. Герметизация неподвижных соединений // Российский технологический журнал. 2020. Т.8(5). С.78-90.

7. Bickford J.H. Gaskets and gasketed joints. CRC press: Boca Raton. 2014.

8. Шишкин С.В., Шишкин С. С. Расчет на герметичность фланцевых соединений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. (3). 75-82.

9. Aibada N., Manickam R., Gupta K.K., Raichurkar P. Review on various gaskets based on the materials, their characteristics and applications // International Journal on Textile Engineering and Processe. 2017. V.3(1). P.12-18.

10. Krishna M.M., Shunmugam M.S., Prasad N. S. A study on the sealing performance of bolted flange joints with gaskets using finite element analysis // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2007. V.84(6). P.349-357.

11. Brown R.L., Richards J.C. Principles of powder mechanics. Pergamon Press: Oxford. 1970.

12. Chen W.F., Mizuno E. Nonlinear analysis in soil mechanics. Elsevier: Amsterdam. 1990.

13. Цеменко В. Н. Деформирование порошковых сред. СПб.: Изд-во СПбГТУ. 2001. 104 с.

14. Кулак М.И. Фрактальная механика материалов. Мн.: Выш. шк. 2002. 304 с.

15. Owens R.G., Phillips T.N. Computational rheology. World Scientific: Singapore. 2002.

16. Dill E.H. Continuum mechanics: elasticity, plasticity, viscoelasticity. CRC press: Boca Raton. 2006.

17. Schulze D. Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow. Springer: Berlin. 2008.

18. Modelling of Powder Die Compaction / Eds.: P.R. Brewin, O. Coube, P. Doremus, J.H. Tweed. Springer: London. 2008.

19. Haeri S., Wang Y., Ghita O., Sun J. Discrete element simulation and experimental study of powder spreading process in additive manufacturing // Powder Technology. 2017. V.306. P.45-54.

20. Mazor A., Orefice L., Michrafy A., De Ryck A., Khinast J.G. A combined DEM & FEM approach for modelling roll compaction process // Powder Technology. 2018. V.337. P.3-16.

21. Jiang M., Zhang A., Shen Z. Granular soils: from DEM simulation to constitutive modeling // Acta Geotechnica. 2020. V.15(7). P.1723-1744.

22. Guyer R.A., Johnson P.A. Nonlinear mesoscopic elasticity: the complex behaviour of rocks, soil, concrete. John Wiley & Sons: Weinheim. 2009.

23. Mayergoyz I.D. Hysteresis models from the mathematical and control theory points of view // Journal of Applied Physics. 1985. V.57(8). P.3803-3805.

24. Guyer R.A., McCall K.R., Boitnott G.N., Hilbert Jr L.B., Plona T.J. Quantitative implementation of Preisach-Mayergoyz space to find static and dynamic elastic moduli in rock // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1997. V.102(B3). P.5281-5293.

25. Guyer R.A. Hysteretic elastic systems: Geophysical materials / Sci. Hysteresis. 2006. V.3. P.555-688.

26. Guyer R.A., Kim H.A., Derome D., Carmeliet J., TenCate J. Hysteresis in modeling of poroelastic systems: Quasistatic equilibrium // Physical Review E. 2011. V.83(6). P.061408.

27. Sajeva A., Capaccioli S. Including plastic strain into the discrete Preisach-Mayergoyz space: Application to granular media // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2019. V.124(11). P.10983-10998.

28. Nowak Z. Constitutive modelling and parameter identification for rubber-like materials // Engineering Transactions. 2008. V.56(2). P.117-157.

29. Rasolofosaon P.N. Unified phenomenological model for the mechanical behavior of rocks // Geophysics. 2009. V.74(5). P.WB107-WB116.

30. Watson T.J., Wert J.A. On the development of constitutive relations for metallic powders // Metallurgical and Materials Transactions A. 1993. V.24(9). P.2071-2081.

31. He H., Zhang Q., Zhang Y., Chen J., Zhang L., Li F. A comparative study of 85 hyperelastic constitutive models for both unfilled rubber and highly filled rubber nanocomposite material // Nano Materials Science. 2022. V.4(2). P.64-82.

32. Johanson J.R. Stress and velocity fields in the gravity flow of bulk solids // Journal of Applied Mechanics. 1964. V.31(3). P.499-506.

33. Johanson J.R. A rolling theory for granular solids // ASME Journal of Applied Mechanics Series E. 1965. V.32(4). P.842–848.

34. Reynolds G., Ingale R., Roberts R., Kothari S., Gururajan B. Practical application of roller compaction process modeling // Computers & chemical engineering. 2010. V.34(7). P.1049-1057.

35. Dec R.T., Zavaliangos A., Cunningham J.C. Comparison of various modeling methods for analysis of powder compaction in roller press // Powder Technology. 2003. V.130(1-3). P.265-271.

36. Hsu S. H., Reklaitis G.V., Venkatasubramanian V. Modeling and control of roller compaction for pharmaceutical manufacturing. Part I: Process dynamics and control framework // Journal of Pharmaceutical Innovation. 2010. V.5(1). P.14-23.

37. Keizer H.L., Kleinebudde P. Elastic recovery in roll compaction simulation // International Journal of Pharmaceutics. 2020. V.573. P.118810.

38. Han L. H., Elliott J.A., Bentham A.C., Mills A., Amidon G.E., Hancock B.C. A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders // International Journal of Solids and Structures. 2008. V.45(10). P.3088-3106.

39. Phani K.K., Niyogi S.K. Young's modulus of porous brittle solids // Journal of Materials Science. 1987. V.22(1). P.257-263.

40. Herakovich C.T., Baxter S.C. Influence of pore geometry on the effective response of porous media // Journal of Materials Science. 1999. V.34(7). P.1595-1609.

41. Pabst W., Uhlirova T., Gregorova E., Wiegmann A. Young's modulus and thermal conductivity of model materials with convex or concave pores–from analytical predictions to numerical results // Journal of the European Ceramic Society. 2018. V.38(7). P.2694-2707.

42. Hsieh A., Dyskin A.V., Dight P. The increase in Young′ s modulus of rocks under uniaxial compression // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014. V.70. P.425-434.

43. Dowell M.B., Howard R.A. Tensile and compressive properties of flexible graphite foils // Carbon. 1986. V.24(3). P.311-323.

44. Leng Y., Gu J., Cao W., Zhang T.Y. Influences of density and flake size on the mechanical properties of flexible graphite // Carbon. 1998. V.36(7-8). P.875-881.

45. Chung D.D.L. Flexible graphite for gasketing, adsorption, electromagnetic interference shielding, vibration damping, electrochemical applications, and stress sensing // Journal of Materials Engineering and Performance. 2000. V.9(2). P.161-163.

46. Celzard A., Mareche J. F., Furdin G. Modelling of exfoliated graphite // Progress in materials science. 2005. V.50(1). P.93-179.

47. Афанасов И.М., Савченко Д.В., Ионов С.Г., Русаков Д.А., Селезнев А.Н., Авдеев В.В. Теплопроводность и механические свойства терморасширенного графита // Неорганические материалы. 2009. Т.45(5). С.540-544.

48. Cermak M., Perez N., Collins M., Bahrami M. Material properties and structure of natural graphite sheet // Scientific reports. 2020. V.10(1). P.1-12.

49. Адамов А.А., Келлер И.Э., Подкина Н.С. Базовые эксперименты для идентификации КЭП-модели пластичности гибкого графита // Вестник ЧГПУ им. ИЯ Яковлева: Механика предельного состояния. 2020. №3. С.130-140.

50. ГОСТ 33784-2016. Материалы уплотнительные и прокладки из них. Метод определения сжимаемости и восстанавливаемости. М.: Стандартинформ. 2016. 8 с.

51. ГОСТ 34708-2021. Уплотнительные материалы на основе терморасширенного графита. М.: Стандартинформ. 2021. 54 с.

52. EN 13555:2014. Flanges and their joints – Gasket parameters and test procedures relevant to the design rules for gasketed circular flange connections.

53. DIN 28090-2-2014. Static gaskets for flange connections. Gaskets made from sheets. Part 2: Special test procedures for quality assurance.

54. Fujii Y., Makasi M., Kodama J.I., Fukuda D., Goto K., Kumakura S., Kanaoka M., Dassanayake A.B.N. Tangent modulus method–An original method to measure in-situ rock stress // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. V.82. P.148-155.

55. Malkowski P., Ostrowski L., Brodny J. Analysis of Young's modulus for Carboniferous sedimentary rocks and its relationship with uniaxial compressive strength using different methods of modulus determination // Journal of Sustainable Mining. 2018. V.17(3). P.145-157.

56. Bhashyam G.R. ANSYS mechanical - a powerful nonlinear simulation tool. Ansys Inc. 2002. V.1(1).

57. Bouzid A.H., Champliaud H. Contact stress evaluation of nonlinear gaskets using dual kriging interpolation // Journal of Pressure Vessel Technology. 2004. V.126(4). P.445-450.

Волгин Владимир Мирович, д-р техн. наук, профессор, volgin@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Потапов Андрей Алексеевич, аспирант, potapov-kristall@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Калиш Павел Эдуардович, аспирант, pavel.kalish13@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Малахо Артем Петрович, канд. хим. наук, доцент, malakho@yandex.ru, Россия, Москва, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, УНИХИМТЕК

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SEALING MATERIALS

V.M. Volgin, A.A. Potapov, P.E. Kalish, A.P. Malakho

The widespread use of seals made of polymer and carbon materials requires an accurate determination of the complex of physical and mechanical properties used in the calculations of the compacted units. This work is devoted to the analysis of modern scientific and technical literature devoted to theoretical and experimental studies of the physical and mechanical properties of sealing materials.

Key words: sealing materials, physical and mechanical properties, cyclic loading, experimental study, analytical approximation.

Volgin Vladimir Mirovich, doctor of technical sciences, professor, volgin@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Potapov Andrey Alekseevich, postgraduate, potapov-kristall@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kalish Pavel Eduardovich, postgraduate, pavel.kalish13@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Malakho Artem Petrovich, candidate of chemical sciences, docent, malakho@yandex.ru, Russia, Moscow, Lomonosov Moscow State University, UNICHIMTEK

УДК 621.914.54
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-437-438

СРАВНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ОБКАТНОГО ШЛИФОВАНИЕ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ И ПРЕРЫВИСТОГО ПРОФИЛЬНОГО ДВУХСТОРОННЕГО ШЛИФОВАНИЯ КОНИЧЕСКИМ КРУГОМ

Е.А. Шкаликов, Д. С. Макашин, О. П. Коржова

Шлифование зубчатых колес является важной операцией в процессе производства механических устройств. Оно позволяет достичь высокой точности и качества поверхности зубьев, что в свою очередь обеспечивает правильную и эффективную работу механизмов при эксплуатации. В процессе производства зубчатых колес важной задачей является их обработка. Для ее решения рассмотрены различные методы шлифования, используемые в промышленности: непрерывное обкатное шлифование червячным шлифовальным кругом и прерывистое профильное шлифование двухсторонним коническим кругом

Ключевые слова: шлифовальный круг, обкатное непрерывное зубошлифование, абразивный червячный круг, зубошлифование, точность, обработка.

Непрерывное обкатное червячное шлифование характеризуется высокой производительностью. В качестве инструмента используют абразивный червячный круг с наружным профилем глобоидной формы, который охватывает сектор зубьев колеса. По всей ширине зацепления между боковыми сторонами зубьев заготовки и червячным кругом имеет место линейный контакт [1, 2].

При непрервыном зубошлифовании цилиндрическим червячным кругом профиль зубьев формируется благодаря сложению ряда движений, сообщаемых станком зубчатому колесу и абразивному червячному кругу. На рис. 1 представлена схема обкатного непрерывного зубошлифования цилиндрическим червячным кругом.

Непрерывный обкатный червячный шлифовальный круг является одним из наиболее распространенных типов абразивных кругов. Он имеет равномерную структуру абразивного материала, которая обеспечивает постоянную обработку поверхности. Этот тип круга обладает высокой стойкостью к износу и способен обрабатывать большие объемы материала без потери качества. Однако, непрерывный обкатный червячный круг может оставлять более грубую поверхность после шлифования, что может потребовать дополнительной обработки для достижения требуемой шероховатости [3].

При непрерывном зубошлифовании в момент входа или выхода зубьев из зацепления могут образовываться погрешности профиля зуба по причине того, что число зубьев, находящихся в зацеплении с левой и правой боковой стороны, разное [4, 5]. Такая погрешность может расти с увеличением угла подъема витка червячного шлифовального круга, что препятствует применению многозаходных инструментов. Непрерывное шлифование в отличие от прерывистого профильного практически исключает погрешности шага и обеспечивает наибольшую производительность обработки [6].

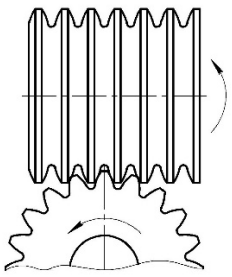


Рис. 1. Схема обкатного непрерывного зубошлифования червячным кругом

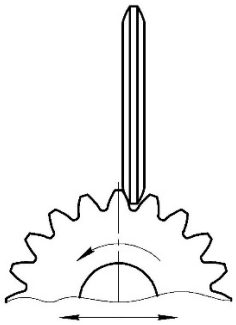


Рис. 2. Схема прерывистого профильного двухстороннего шлифования коническим кругом

Прерывистый профильный двухсторонний конический круг, с другой стороны, имеет особую форму, которая позволяет точно контролировать процесс шлифования. Прерывистое профильное зубошлифование производят вращающимся шлифовальным кругом при продольном движении подачи круга вдоль оси заготовки представлена на рис. 2. Этот тип круга обладает высокой точностью обработки и способен создавать поверхности с высокой степенью шероховатости.

Прерывистый профильный круг также может использоваться для шлифования сложных форм и контуров, что делает его идеальным выбором для задач, требующих высокой точности. Низкая производительность метода и специальные требования к предварительной обработке зубьев обусловили его применение для эталонных, мерительных и других высокоточных колес [7, 8].

Прерывистое профильное зубошлифование характеризуется высокой теплонапряженностью процесса вследствие линейного контакта между боковыми поверхностями зубьев и профилем шлифовального круга, поэтому высока вероятность образования прижогов на поверхности зубьев.

При сравнении этих двух типов кругов следует учитывать различные факторы, так непрерывный обкатный червячный шлифовальный круг имеет непрерывное абразивное покрытие, что позволяет равномерно распределить нагрузку на поверхность изделия. Обкатные шлифовальные круги обладают высокой износостойкостью и долгим сроком службы [10]. Они обеспечивают высокую скорость снятия материала и возможность получения высокой точности шлифовки. Непрерывное абразивное покрытие позволяет достичь равномерности обработки по всей поверхности изделия.

При этом прерывистый профильный двухсторонний конический круг имеют специальный профиль, который позволяет выполнять более сложные операции шлифовки. Прерывистое абразивное покрытие на круге позволяет улучшить эффективность шлифовки и снизить нагрев поверхности. Эти круги имеют высокую точность формы и поверхности, что позволяет достичь требуемого качества изделия [11, 12]. Прерывистый профильный круг позволяет выполнять шлифовку с разными углами и формами, что расширяет область его применения.

Основным критерием, по которым можно оценить производительность рассмотренных в статье способов шлифования является объем снятого материала в единицу времени. При непрерывном обкатном способе шлифования объем снимаемого материала в единицу времени, при обработке зубчатых колес с модулем 2 - 5 мм, абразивными шлифовальными кругами в 4–5 раз превышает тот же объем, при прерывистом профильном зубошлифовании [13].

Сравнение непрерывного обкатного шлифование червячным кругом и прерывистого профильного двухстороннего шлифования коническим кругом

Критерии обработки	Непрерывного обкатного шлифование червячным кругом	Прерывистого профильного двухстороннего шлифования коническим кругом
Необходимо уменьшение времени обработки	Рекомендуется	Не рекомендуется
Необходимо уменьшение обработать детали с большим припуском	Рекомендуется	Не рекомендуется
Обладает высокой износостойкостью и долгим сроком службы	Рекомендуется	Не рекомендуется
Высокое качество получаемой поверхности	Не рекомендуется	Рекомендуется
Сложный профиль получаемого зуба	Не рекомендуется	Рекомендуется
Сложность наладки оборудования	Не рекомендуется	Рекомендуется

Таким образом, если требуется высокая степень шероховатости поверхности, точное контролирование процесса шлифования и более равномерную обработку по всей поверхности изделия, то прерывистый профильный двухсторонний конический круг позволяет выполнять более сложные операции шлифования с разными углами и формами. Однако, если необходимо обработать большие объемы материала и стойкость к износу является важным критерием, то непрерывный обкатный червячный шлифовальный круг может быть более подходящим вариантом. Полученные критерии сравнения непрерывного обкатного шлифование червячным кругом и прерывистого профильного двухстороннего шлифования коническим кругом представлены в таблице.

В заключение, непрерывный обкатный червячный шлифовальный круг и прерывистый профильный двухсторонний конический круг оба являются эффективными инструментами для шлифования. Выбор между ними зависит от требований конкретной задачи, таких как степень шероховатости, объем материала и сложность формы.

Список литературы

1. Воронов А.Э. Совершенствование финишной обработки зубчатых колес за счет новой технологии формообразования шлифовальных кругов: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Воронов Артур Эдуардович. Луганс, 2017. 157 с.

2. Соколова, И. Д. Анализ методов шлифования зубчатых колес на современном оборудовании / И. Д. Соколова, А. С. Свитка // Инновационная наука. 2016. № 9(21). С. 83-87.

3. Астапова И.В. Методы шлифования теоретически точного эвольвентного профиля зубьев сборных червячных фрез с поворотными твёрдосплавными рейками / И. В. Астапова, Е. А. Терешко // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении : IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов, Тула, 18–20 апреля 2023 года. Тула: Тульский государственный университет, 2023. С. 56-60.

4. Иванова Т.Н. Технологические особенности зубошлифования // Машиностроение: инновационные аспекты развития: Материалы III международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: Индивидуальный предприниматель Жукова Елена Валерьевна, 2020. Том № 3. С. 91-95.

5. Шавуров М.В. Моделирование погрешностей при формообразовании зубьев цилиндрических колес методом копирования / М. В. Шавуров, Ю. Е. Махаринский, Д. Г. Латушкин // Материалы докладов 52-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2019. Том 2. С. 356-359.

6. Калашников А.С. Современные методы чистовой обработки зубьев цилиндрических колес // Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов. Международный информационно-технический журнал. Харьков, 2007. № 5. С. 38-42.

7. Братан С.М. Исследование качества поверхностного слоя зубьев высокоточных зубчатых колес при шлифовании / С. М. Братан, Е. А. Левченко, В. А. Крамарь // Инновации в машиностроении : сборник трудов IX Международной научно-практической конференции / Под редакцией А.М. Маркова, А.В. Балашова, М.В. Доц. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2018. С. 21-26.

8. Калашников А.С. Определение припусков при непрерывном обкатном шлифовании зубьев цилиндрических колес / А. С. Калашников, Ю. А. Моргунов, В. М. Аббясов // Вестник машиностроения. 2021. № 2. С. 19-24.

9. Расулов Н.М. Нестабильность глубины резания при шлифовании зубьев зубчатых колес методом копирования / Н. М. Расулов, Е. Т. Шабиев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 12(681). С. 79-86.

10. Солдатов А.Г. Исследование шероховатости при шлифовании зубчатых колес // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2023. № 1(89). С. 44-48.

11. Караванова А.Г. Анализ новизны изготовления авиационных зубчатых колес // XLVI Гагаринские чтения: Сборник трудов Международной молодежной научной конференции. Секция «Механика и моделирование материалов и технологий». Москва: Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2020. С. 58-59.

12. Чистовая обработка зубьев закаленных цилиндрических передач зубохонингованием / А. С. Калашников, Ю. А. Моргунов, А. Н. Васильев, А. Г. Караванова // Справочник. Инженерный журнал. 2022. № 8(305). С. 11-16.

13. Худяков А.А. Исследование процесса шлифования криволинейных зубьев конических и гипоидных передач // Гагаринские чтения - 2018: Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции. Москва-Байконур-Ахтубинск: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. Том 3. С. 360-361.

Шкаликов Егор Андреевич, магистр, schkalikov_egor@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университета,

Макашин Дмитрий Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, dima.makashin@gmail.com, Россия, Омск, Омский государственный технический университета,

Коржова Ольга Павловна, канд. техн. наук, доцент, op_kor@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университета

COMPARISON OF CONTINUOUS RUNNING-IN GRINDING WITH A WORM WHEEL AND INTERMITTENT PROFILE DOUBLE-SIDED GRINDING WITH A CONICAL WHEEL.

E.A. Shkalikov, D.S. Makashin, O.P. Korzhova

Grinding of gear wheels is an important operation in the production process of mechanical devices. It allows to achieve high accuracy and quality of teeth surface, which in turn provides correct and efficient operation of mechanisms in operation. In the process of production of gears an important task is their processing. For its solution various methods of grinding used in industry are considered: continuous running-in grinding with a worm grinding wheel and intermittent profile grinding with a double-sided conical wheel.

Key words: grinding wheel, running-in continuous gear grinding, abrasive worm wheel, gear grinding, precision, machining.

Shkalikov Egor Andreevich, magister, schkalikov_egor@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Makashin Dmitry Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, dima.makashin@gmail.com, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Korzhova Olga Pavlovna, candidate of technical sciences, docent, op_kor@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 621
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-440-441

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС МЕТОДОМ ШЕВИНГОВАНИЯ

А.О. Чечуга

В работе рассмотрен процесс шевингования, его особенности и достоинства. Описаны конструктивные особенности инструмента шевера, а также различные методы шевингования, применяемые для обработки зубчатых колёс различной конфигурации. Проанализированы способы повышения эффективности обработки зубьев с помощью дискового шевера. Представлена технология и схема обработки зубчатых колёс шевингованием-прикатыванием.

Ключевые слова: шевингование, шевер, параллельность осей, внеполюсное зацепление, шевингование-прикатывание.

Процесс шевингования является высокоэффективной обработкой зубчатых колёс, позволяющей добиваться высокой степени точности обрабатываемой поверхности зубьев. Данный метод механической обработки зубчатых колёс был разработан и внедрен американской компанией National Broach в 30-х годах XX века, а в 1936 году впервые был применен в России на Московском автомобильном заводе имени Сталина для изготовления элементов коробок передач.

Шевингование представляет собой удаление металла с поверхности изделия путем механического воздействия режущих граней инструмента по средствам создания зубчатой пары представлен на рис.1. Зубья шевера входят в зацепление с зубьями необработанного колеса, после чего, под действием вращения, создаваемого станком, инструмент срезает слои металла заготовки до требуемых параметров изделия [1].

Достоинствами данного процесса обработки являются высокая точность изготавливаемого изделия и производительность самой обработки. Во многих случаях необходимость шлифования полученных зубьев колеса пропадает, поскольку, при точном соответствии технологических параметров процесса обработки расчётным, шероховатость поверхности отвечает поставленным требованиям [2].

Существует несколько видов обработки шевингованием:

- Реечным шевером;
- Червячным шевером;
- Дисковым шевером: с тангенциальной, диагональной, осевой подачей, а также с точкой скрещивания на торце шевера.

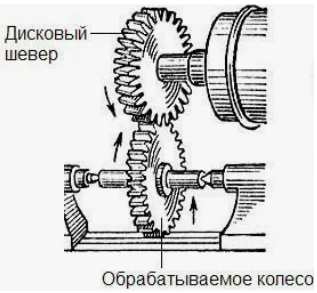


Рис. 1. Процесс шевингования зубчатого колеса дисковым шевером

Результатом применения процесса шевингования является уменьшение кинематической погрешности от 15% до 20%, а циклической погрешности на зуб, в среднем, на 50% [3].

Шевингование зубчатых колёс при параллельных осях методом принудительного обката представляет собой процесс, при котором обработка ведётся только по одной стороне профиля зуба. Для осуществления данной технологии применяется шевер типа “долбяк”. Главное его отличие заключается в переднем угле при вершине, который может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Задний же угол отсутствует, поскольку кромка шевера при вершине не учувствует в процессе обработки.

В ходе исследований было установлено, что для наилучшего нарезания зубьев необходим шевер с передним угол равным -30º и задним углом в диапазоне от 2 º до 4º [4].

Значение осевой подачи выбирается на основании требований к шероховатости поверхности изделия.

С целью уменьшения величины отклонений профиля зуба шевера от эвольвенты используют угловое корригирование, которое состоит в том, что, в зависимости от значений переднего угла, профильный угол исходного контура рейки боковой поверхности шевера берется либо большим, либо меньшим [5].

Для обработки зубчатых колёс работающих при параллельных осях и имеющих ширину венца больше 20 мм необходимо высокие радиальные усилия. Для обеспечения данного процесса обработки ширина зубчатого венца шевера принимается меньше ширины венца колеса, а направление режущих кромок на сторонах зубьев шевера необходимо сделать противоположной. Весь процесс происходит при продольной подаче.

Шевингование-прикатывание прямозубых цилиндрических колёс происходит следующим образом: инструмент находится в беззазорном зацеплении с заготовкой, а обработка ведется с периодической радиальной подачей. Процесс обработки включает в себя поворот инструмента в прямом и обратном направлениях на количество оборотов соответствующее зубьям колеса.

Для чистовой обработки цилиндрических колёс с круговыми зубьями используют различные специальные инструменты:

- В виде резцовой головки, торец корпуса которого содержит группы резцов со спиральным расположением. Главным недостатком данного инструмента является необходимость применения дополнительной абразивной обработки для придания требуемого уровня шероховатости изделия.

- В виде дискового шевера, режущие кромки которого расположены на боковых эвольвентных поверхностях зубьев со смещением исходного контура. Недостатком инструмента является его узкая специфика применения, а также ограниченные технологические возможности [6].

- В виде зубчатого колеса с режущими кромками на боковых поверхностях зубьев.

Третий вид инструмента позволяет исключить влияние зависимости конструкции от формы линии обрабатываемых зубьев. Конструкция представляет собой зубчатое колесо, боковые поверхности которого являются эвольвентами, а режущие кромки образованы пересечением боковых поверхностей зубьев и стружечной канавки.

Обработка происходит следующим образом:

1. Заготовка входит в зацепление с инструментом.

2. За счет скольжения режущих кромок инструмента по зубьям колеса, в точке контакта, происходит срезания слоя материала. Обработка осуществляется при параллельности осей инструмента и заготовки, что достигается за счет смещения режущих кромок относительно друг друга, на величину равную дельта.

3. Реверсивное прокручивание зубчатой пары с целью занятия исходного положения.

4. Сближение зубьев колеса и инструмента до полного зацепления.

5. Повторная обработка.

Количество проходов обусловлено геометрическими требованиями к конструкции обрабатываемого изделия.

Для обеспечения максимальной производительности процесса обработки необходимо соблюдать отсутствие общих множителей между числами зубьев инструмента и колеса.

Существует несколько способов нарезания круговых зубьев зубчатых колёс:

- Инструментом в виде двух планшайб с режущими элементами, расположенными равномерно по окружности выступов. Планшайбы вращаются со сдвигом фаз на угол, имеющий обратную зависимость от числа выступов впадин. Данный способ подходит исключительно для обработки бочкообразных зубьев с линией отличной от дуги окружности.

- Инструментом со спиралевидной поверхностью под прямым углом к заготовке методом непрерывного деления. Подача инструмента осуществляется вдоль оси обрабатываемого колеса. Данный метод не подходит для обработки симметричных круговых зубьев [7].

- Методом свободного обката, при котором зацепление между шевером и зубчатым колесом выполнено неполосным образом. Обработка ведется с радиальной подачей определённой периодичности после нескольких рабочих циклов. При данной методике существует ограничение, связанное с минимальным количеством зубьев колеса, поскольку невозможно выполнить условие внеполюсного зацепления, что обусловлено геометрией режущих зубьев, а именно их заострением.

Для обработки колёс с малым числом зубьев применяют метод свободного обката с внеполюсным зацеплением. Процесс обработки осуществляется с периодической радиальной подачей после нескольких рабочих циклов [8].

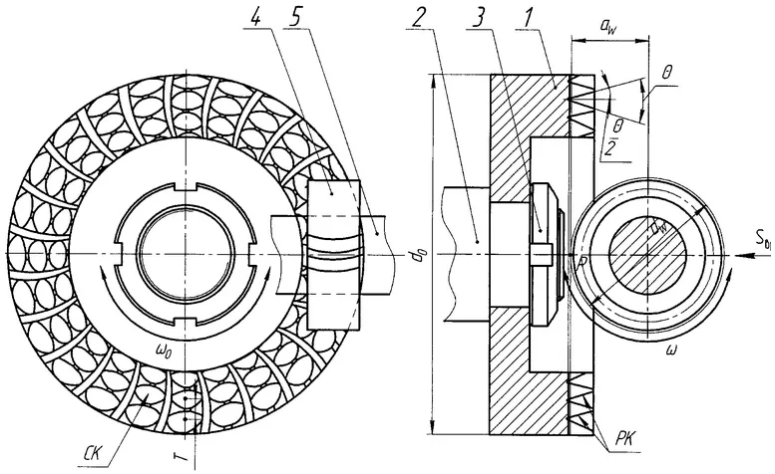


Рис. 2. Схема обработки цилиндрических зубчатых колёс шевингованием-прикатыванием

Инструмент, применяемый в ходе данной обработки, имеет ряд особенностей:

- Единственный общий множитель числа зубьев инструмента и обрабатываемого колеса является единицей;

- Зубья инструмента могут иметь либо арочную, либо круговую форму;

- Режущие кромки зубьев располагаются на плоском производящем колесе.

Сам инструмент представляет собой плоское производящее колесо, закреплённое гайкой на оправке цилиндрической формы.

Обработка цилиндрических зубчатых колёс методом шевингования-прикатывания подходит для заготовок, изготовленных с помощью литья, механообработки, пластической деформации и другими способами.

На рис.2 на цилиндрической оправке 2 установлен инструмент 1, зафиксированный гайкой 3. Колесо 4 свободно установлено на оправку 5 и введено в беззазорное зацепление с самим инструментом, который сообщает вращательное движение в обоих направлениях.

Чтобы обработка боковых поверхностей зубьев обеспечивалась по всей длине, необходимо выполнить два условия:

1. Режущие кромки соседних зубьев, смещенные относительно друг друга, должны быть образованы пересечением между боковыми поверхностями зубьев и винтовыми поверхностями стружечной канавки.

2. Отсутствие общих множителей количества зубьев заготовки и инструмента.

В процессе обработки инструмент и колесо совершают количество оборотов равное число зубьев друг друга. Врезание происходит под углом 90 º на глубину 0,03…0,05 мм. Полный цикл обработки состоит из 4 или 5 рабочих циклов.

Для максимальной эффективности обработки и высокой производительности число зубьев инструмента должно иметь максимально возможное значение, а диаметр начальной окружности колеса должен быть за пределами активного участка профиля, чтобы соблюдать внеполюсное зацепление.

Поскольку обработка круговых зубьев является сложным процессом, требующим высоких параметров точности и эффективности инструмента, процесс обработки цилиндрических зубчатых колёс методом шевингования-прикатывания является перспективным объектом для исследований. Технология изготовления подобного инструмента требует детальной проработки и расчёта эффективности средств ее осуществления. Новые подходы позволят сократить себестоимость изготовления шевера-прикатника, и, как следствие, удешевить процесс обработки круговых зубьев цилиндрических колёс.

Наиболее перспективным способом является комбинированная обработка фрезами различного диаметра под углом к оси инструмента.

Список литературы

1. Козлов Д.Н. Шевингование. Учебное пособие для индивидуальной и бригадной подготовки рабочих на производстве. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: «Высш. школа», 1967. 144 с.

2. Козлов Д.Н. Шевинговальщик. Профтехиздат, 1962. 146 с.

3. Родин П.Р. Технология изготовления зуборезного инструмента. К.: Техника, 1982. 208 с.

4. Маликов А.А. Основы высокоэффективной технологии обработки зубьев цилиндрических колёс: монография. Тула: Изд-во ТулГ, 2008. 271 с.

5. Болтовская Т.П., Болтовский И.А. Справочник по корригированию зубчатых колес. М.: Машиностроение, 1967. 240 с.

6. Болтовский И.А. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых передач: справочник.М.: Машиностроение, 1986. 448 с.

7. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.

8. Тайц Б.А. Производство зубчатых колес. Справочник. Машгиз, 1963. 684 с.

Чечуга Антон Олегович, аспирант, chechugaanton@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

RESEARCH OF THE PROCESS OF PROCESSING GEARS BY THE SHEVING METHOD

A.O. Chechuga

The work discusses the shaving process, its features and advantages. The design features of the shaver tool are described, as well as various shaving methods used for processing gears of various configurations. Methods for increasing the efficiency of tooth processing using a disk shaver are analyzed. The technology and scheme for processing gears by shaving and rolling are presented.

Key words: shaving, shaving, parallelism of axes, non-polar engagement, shaving-rolling.

Chechuga Anton Olegovich, postgraduate, chechugaanton@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 67.05
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-443-444

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ, СНИЖЕНИЯ ШУМА И ВИБРАЦИИ ПРИ РАБОТЕ ЛЕНТОЧНОПИЛЬНЫХ СТАНКОВ

А.Е. Литвинов, А.А. Сизо, А.Н. Чукарин

В данной статье представлены результаты разработки комплексного устройства, внедренного в конструкцию ленточнопильных станков с целью повышения стойкости режущего инструмента, снижения шума и вибрации при работе на ленточнопильных станках, а также повышения точности и производительности всего процесса резания.

Ключевые слова: ленточнопильные станки, шум, вибрация, устойчивость процесса резания, жесткость.

Конструктивные особенности ленточнопильных станков заключаются в наличии длинных, менее жестких ленточных пил и отрезаемых заготовок различных конфигураций и размеров. К ним относятся приводные (4) и натяжные (5) диски, установленные на пильной раме (1), направляющие (2) и направляемые (3) пилы, а также заготовка (6), установленная на столе станка (7), которая вращает полотно перпендикулярно плоскости заготовки в зоне резания.

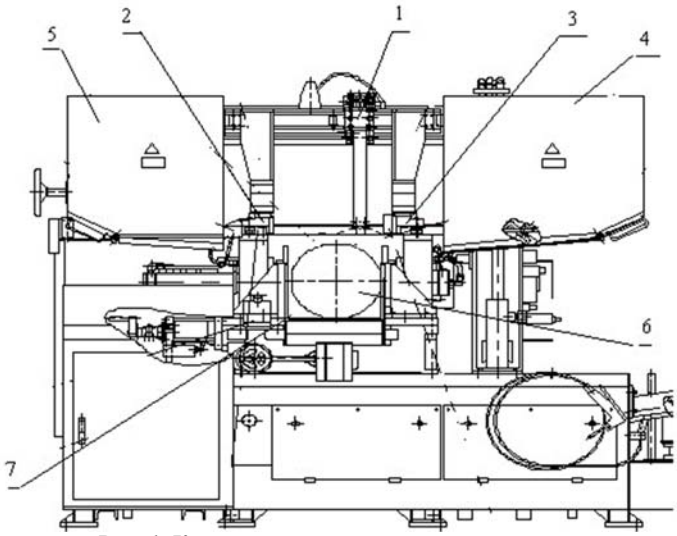


Рис. 1. Компоновка ленточнопильного станка

Как видно из рис.1, "активным" источником излучения является пила между направляющими и сами направляющие, на которые поступает поток колебательной энергии от пилы. [1-3]

Результаты проведенного ранее исследования показали, что в большинстве случаев при работе ленточнопильных станков не выполняются положения гигиенических нормативов по шуму [4].

Для снижения звукового излучения и вибрации до санитарных норм было разработано и запатентовано композиционное устройство. Данное композиционное устройство включает демпфер шума и вибрации, представляющий собой дополнительную опору для пилы с элементами из металла и капролона-материала с высокими демпфирующими свойствами (в данном случае пила представляет собой систему, состоящую из нескольких излучателей, размеры которых значительно меньше), который снижает интенсивность звукового излучения пилы, на самом источнике энергетического излучения. Это повышает стойкость режущего инструмента.

Такая конструкция режущего узла позволяет снизить шум ленточнопильного станка при работе до санитарных норм, повысить долговечность режущего инструмента, точность и качество процесса резания за счет значительного снижения вибрации.

Разработанное устройство гашения шума и вибрации (рис.2) состоит из приводного (3) и натяжного (2) дисков, установленных на пильной раме (7), направляющей пилы (6), капролонового 4 и металлического 5 роликов, вращающих пилу (1) перпендикулярно плоскости заготовки в зоне резания.

Технические результаты-снижается интенсивность звукового излучения пилы, воздействуя непосредственно на источник излучения звуковой энергии, благодаря чему шум при работе ленточной пилы может быть снижен до санитарных норм, а также повышается стойкость и точность режущего инструмента за счет значительного снижения вибрации (в 10-14 раз на направляющей и в 6 раз на заготовке) [1,2].

Станок с таким устройством работает следующим образом. Во время работы ленточная пила (1), установленная на пильной раме (7), натянутая натяжным диском2 и приводимая в движение приводным диском (3), предварительно поворачивается в зоне резания металлическими роликами (5), которые вращаются вместе с пилой и гасят колебания перед направляющими (6). Затем пила проходит через направляющие, вращаясь строго в плоскости подачи. После направляющих находится капролоновый ролик (4), который находится в тесном контакте с пилой и вращается за счет движения пилы. Высокие демпфирующие свойства капролона, материала, поглощающего ударные нагрузки, обладающего низким коэффициентом трения, доступного по цене, экологичного и долговечного, позволяют снизить звуковое давление в самом источнике.

Одновременная работа металлических и капролоновых роликов снижает вибрацию направляющих и заготовки в 10-14 раз, а вибрацию заготовки-в 6 раз [3].

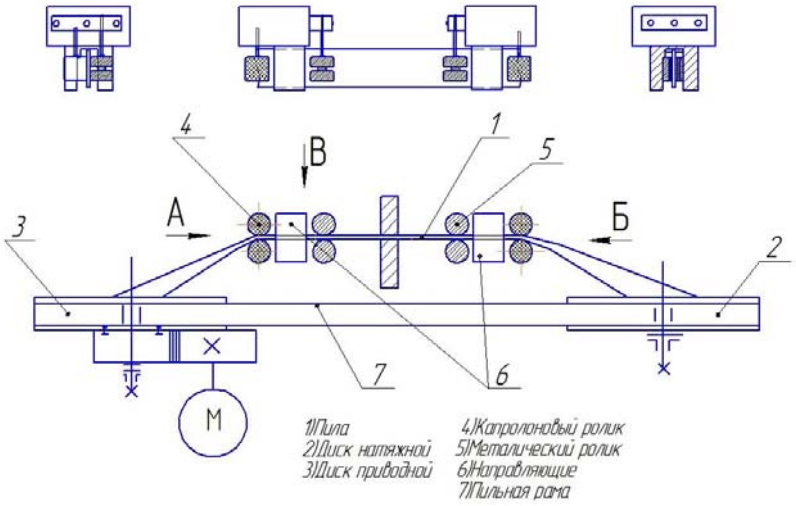


Рис. 2. Система гашения шумов и вибраций

Конструктивно самоустанавливающаяся направляющая имеет сборную вертикальную плиту (5), горизонтальную плиту (7) из твердого сплава и пружину (8), которая демпфирует сборную вертикальную плиту и крепится к пиле (4). Общий вид представлен н арис.2.

Технический результат-снижение нагрузки на пилу, уменьшение увода пилы и повышение стойкости режущего инструмента соответственно.

Станки, оснащенные самоустанавливающимися направляющими, работают следующим образом. Во время работы ленточная пила (4), натягиваемая натяжным диском (2) и приводимая в движение приводным диском (3), предварительно поворачивается в зоне резания металлическими роликами, которые вращаются вместе с пилой и гасят колебания перед направляющей. Затем пила проходит через направляющие (6) и поворачивается строго в плоскости подачи. Направляющие сконструированы таким образом, чтобы минимизировать зазор между сборной вертикальной плитой (5) и пилой. Для обеспечения устойчивости в процессе резания в конструкцию введена горизонтальна я пластина (7), которая подрессоривается пружиной (8). Установка данной направляющей повышает стойкость пилы, точность и качество процесса резания [4,5].

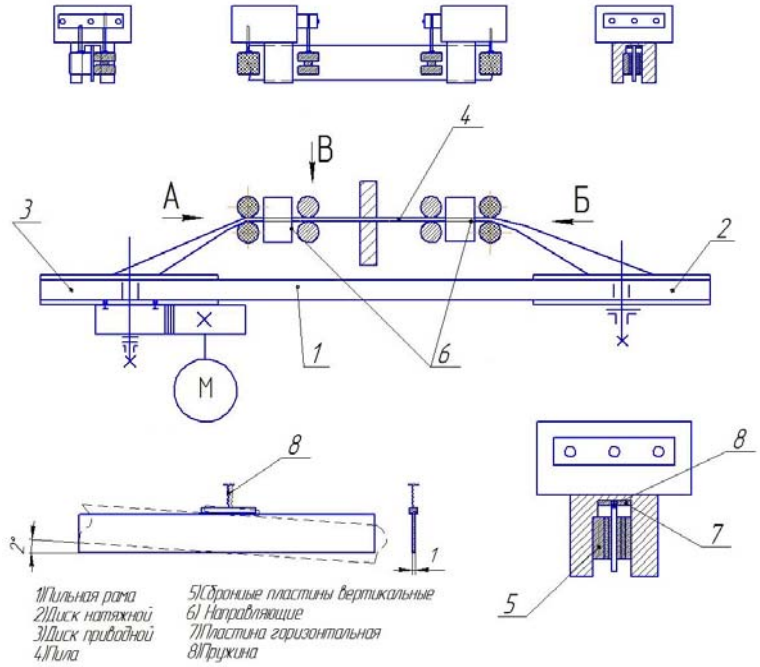


Рис. 3. Самоустанавливающаяся направляющая

Заключение. После апробации предложенного устройства в производственных условиях на АО “Южный завод тяжелого станкостроения” в г. Краснодар было доказано, что установка разработанного шумо- и виброгасителя и самоустанавливающейся направляющей значительно снижает шум на 10 дБ и вибрацию в 10раз, а также увеличивает ресурс режущего инструмента на 10-15%.Кроме того, разработанное устройство характеризуется низкой себе-

стоимостью, простотой конструкции и может быть установлено как на уже эксплуатируемых, так и на изготавливаемых новых станках. В результате устройство является технически возможными экономически эффективным способом повышения стойкости режущего инструмента, точности и качества процесса резания, а также снижения шума и вибрации.

Финансовая поддержка. Работа поддержана Советом по грантам Президента Российской Федерации (Соглашение № МД-2727.2022.4).

Список литературы

1. Сухоносов Н.И., Московский Ю.В., Христофоров Г.А., Корниенко В.Г., Литвинов А.Е. Ленточно-отрезной станок Патент на изобретение RU 2262422 C2, 20.10.2005. Заявка № 2003125195/02 от 14.08.2003.

2. Литвинов А.Е. Повышение стойкости инструмента и точности обработки в ленточнопильных станках. Российские инженерные исследования, 2016. № 9. С. 761-760.

3. Литвинов А.Е. Некоторые аспекты шумообразования отрезных ленточнопильных станков // Сборник статей студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей международной конференции "Векторы развития науки" 2015. С. 74-75.

4. Литвинов А., Корниенко В. Исследование износа и производительности ленточнопильной машины // Европейский журнал естественной истории. 2010. № 1. С. 57.

5. Литвинов А.Е. Оценка влияния резонансной частоты колебаний системы “пила-направляющая пилы” на процесс резания ленточными пилами // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. Научный журнал КубГАУ, №2(96), 2014.

6. Литвинов А.Е. Технические решения по повышению стойкости режущего инструмента и улучшению эксплуатационных свойств ленточнопильных металлорежущих станков / А Е. Литвинов, В.Г, Корниенко // Сборник международной конференции "Современное состояние и перспективы развития технических наук", 2014. С. 49-51.

7. Литвинов А.Е., Новиков В.В., Солод С.А., Чукарин А.Н. Производственные опасности систем пиления // Российские инженерные исследования. 2019. Т. 39. № 2. С. 158-159.

8. Литвинов А.Е., Сизо А.А., Балаев Э.Ю.О. Моделирование процесса нагружения ленточных пил отрезных металлорежущих станков // В сборнике: XXXIV Международная иновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения. Сборник трудов конференции. Москва, 2022. С. 63-68.

Литвинов Артем Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, artstyleone@mail.ru, Россия, Краснодар, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),

Сизо Алан Анзорович, аспирант, alansizo@mail.ru, Россия, Краснодар, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),

Чукарин Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, opm@rgups.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС)

DEVELOPMENT OF EQUIPMENT TO INCREASE THE DURABILITY OF CUTTING TOOLS, IMPROVE THE ACCURACY AND QUALITY OF THE CUTTING PROCESS, REDUCING NOISE AND VIBRATION WHEN OPERATING BAND SAWING MACHINES

A.E. Litvinov, A.A. Sizo, A. N. Chukarin

This article presents the results of the development of a complex device introduced into the design of band saw machines in order to increase the durability of the cutting tool, reduce noise and vibration when working on band saw machines, as well as increase the accuracy and productivity of the entire cutting process.

Key words: band saw machines, noise, vibration, stability of the cutting process, rigidity.

Litvinov Artyom Evgenievich, doctor of technical sciences, professor, artstyleone@mail.ru, Russia, Krasnodar, Kuban State Technological University (KubSTU),

Sizo Alan Anzorovich, postgraduate, alansizo@mail.ru, Russia, Krasnodar, Kuban State Technological University (KubSTU),

Alexander Nikolaevich Chukarin, doctor of technical sciences, professor, head of the department, opm@rgups.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State University of Railway Engineering (RGUPS)

УДК 67.02; 620.172
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-446-447

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ FDM- ПЕЧАТИ

И.С. Говоров, А.А. Потапов, А.Ю. Веневцев

В работе рассмотрено влияние параметров FDM-печати на физико-механические свойства образцов. Были исследованы образцы с заполнением 60,80,100%, при разном сочетании угла наклона растра (0°, 45°, 90°) и высотой слоя 0,1 и 0,2 мм.

Ключевые слова: материалы для 3D печати, адгезия, слои, пористость, параметры печати, FDM – печать.

Введение. Существует множество видов аддитивных технологий, одно из которых это FDM - Fused Deposition Modeling [1]. В процессе FDM печати формируются трехмерные объекты на основе CAD-модели твердого тела, проволочного каркаса или поверхности путем последовательного нанесения отдельных слоев из термопластичных материалов с помощью регулируемой температурной головки. Модель строится слой за слоем, снизу вверх. Изделие получается в виде цельной трехмерной детали без необходимости использования последующей обработки. Материал в виде нити (филамента) подается в терморегулируемую экструзионную головку FDM, нагревающую его до полужидкого состояния. Полужидкая масса экструдируется и в виде нити наносится ультратонкими слоями на основание без дополнительного закрепления. Как только материал наносится на стол с помощью экструзионной головки, он затвердевает, образуя твердую фазу. Ниже на рис.1. представлена схема процесса FDM [2].

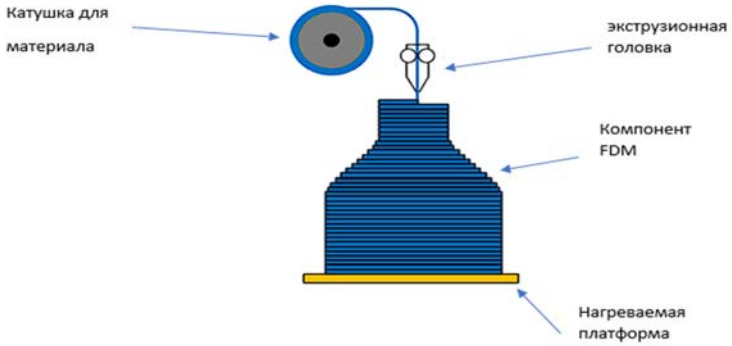
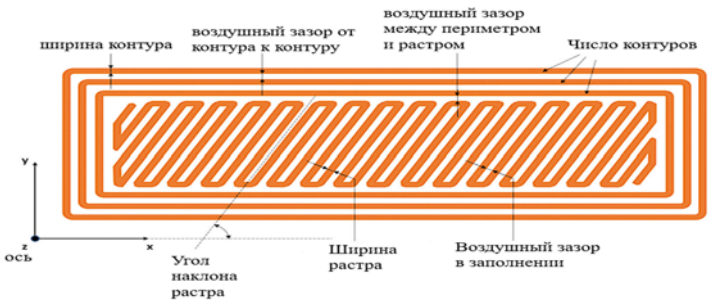


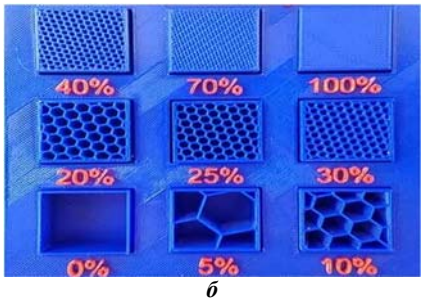
Рис. 1. Принципиальная схема процесса FDM-печати [2]

Параметры печати задаются в специальном программном обеспечении (“слайсере”). На физико-механические характеристики готового изделия влияют различные параметры печати: высота слоя, заполнение и ориентация модели, относительно печатной платформы. Плотность заполнения — это «полнота» внутренней части детали В (“слайсерах”) она обычно определяется в процентах от 0 до 100, при этом 0% делает деталь полой, а 100% — полностью заполненной. Это значительно влияет на вес детали: чем полнее внутренняя часть детали, тем она тяжелее и прочнее.

На рис. 2. можно видеть основные параметры печати и плотность заполнения [3].



а



б

Рис. 2. Основные параметры печати: а – параметры слоя; б – плотность заполнения

Целью настоящей работы является исследование влияния параметров FDM-печати на физико-механические свойства напечатанных образцов.

Методика экспериментальных исследований. В работе исследованы физико-механические свойства образцов, напечатанных методом FDM при разных параметрах печати.

Образцы для исследований были изготовлены из термопластичного материала АБС – (марки REC). Паспортные характеристики материала приведены в табл. 1 [4].

Таблица 1

Основные свойства АБС-пластика марки REC

Показатель	Значение
Плотность, г/см^3	1.05
Прочность на растяжение, МПа	29.6
Модуль упругости при растяжении вдоль слоев, Гпа	1.27
Прочность на изгиб, МПа	65.4
Модуль упругости на изгиб, Гпа	2.14
Прочность на сжатие, МПа	49.3
Модуль упругости на сжатие, Гпа	1.71
Диаметр нити для печати, мм	1.75

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–220°С, нагрузка – 5 кг).

Термические и реологические характеристики АБС-пластика, используемого для печати образцов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Термические и реологические характеристики АБС-пластика марки REC

Показатель	Значение
Температура стеклования, °С	64.6
Температура кристаллизации, °С	130
Температура плавления, °С	230
Начальная температура деструкции, °С	360
Конечная температура деструкции, °С	441
Показатель текучести расплава, г/10 мин	9.89

Для проведения исследований механических свойств использовались тестовые образцы в форме лопаток в соответствии с ГОСТ 11262-2017. Чертеж представлен ниже на рис. 3 [5].

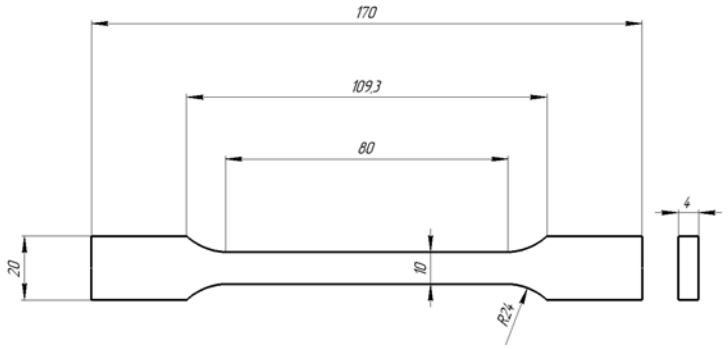


Рис. 3. Чертеж образца для испытаний на растяжение по ГОСТ 11262-2017

В САПР «SolidWorks» были созданы 3D-модели лопаток с размерами в соответствии ГОСТ 9550-81, ГОСТ 11262-80, ГОСТ 4648-2014, ГОСТ 19109-84.

Рис. 4. Лопатка по ГОСТ 11262-80, смоделированная в САПР «SolidWorks»

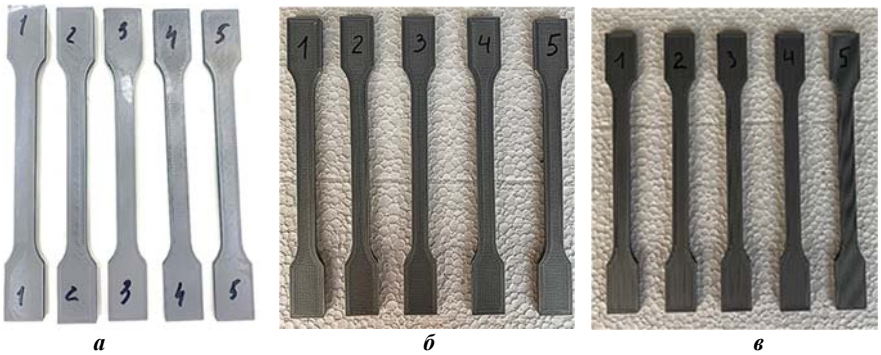
Печать образцов производилась на 3D-принтере Total Z AnyForm 500 PRO. Для подготовки процесса печати было использовано программное обеспечение «UltimateCura». Основные параметры печати представлены в табл. 3.

Таблица 3

Основные параметры печати образцов

Температура печати, °С	235
Температура камеры, °С	105
Высота слоя, мм	0.2/0.1
Угол наклона печати, °	0/45/90
Скорость печати, мм/с	40
Количество слоев стенки	2
Количество слоев крышки	3
Количество слоев дна	3
Заполнения, %	100/80/60

Так же для установления зависимости прочности образцов от процента заполнения было напечатано по 5 образцов с плотностью заполнения 80%, 60%. 15 образцов были напечатаны с 100% заполнением с чередованием угла печати: 0°; 45°; 90° и высотой слоя: 0.2 мм и 0.1 мм. Образцы показаны на рис. 5.



а ***б*** ***в***

Рис. 5. Образцы, изготовленные методом FDM-печати: а – 45°,б – 90°, в – 0°

Методы исследований свойств образцов. Предел текучести, относительное удлинение, прочность при разрушении определяли на разрывной машине в соответствии с ГОСТ 11262-80. Испытания проводились на универсальной испытательной машине РЭМ-А.

Исследования пористости проводились на основании определения плотности образцов. Для измерения плотности использовались гидростатические весы CE224-C. Плотность образцов определялась путем погружения их в рабочую жидкость с известным значением плотности ρ_0.

Сначала определялась масса образца A в воздушной среде, а затем – масса образца B в рабочей жидкости.

Плотность ρ образца рассчитывалась по формуле:

$$\rho = \frac{A}{A-B}(\rho_0 - \rho_L) + \rho_L, \quad (1)$$

где ρ – плотность образца; A – масса образца в воздухе; B – масса образца в рабочей жидкости; ρ_0 – плотность рабочей жидкости; ρ_L – плотность воздуха (0,0012 г/см^3).

Пористость P рассчитывалась по формуле:

$$P = \frac{\rho}{\rho_F}100\%, \quad (2)$$

где ρ_F – плотность филамента для печати, указанная в паспорте на материал; ρ – плотность напечатанных образцов, рассчитанная по формуле (2).

Результаты и обсуждения. На рис. 6. приведены графики зависимости напряжения, выдерживаемого образцом, от изменения угла наклона растра.

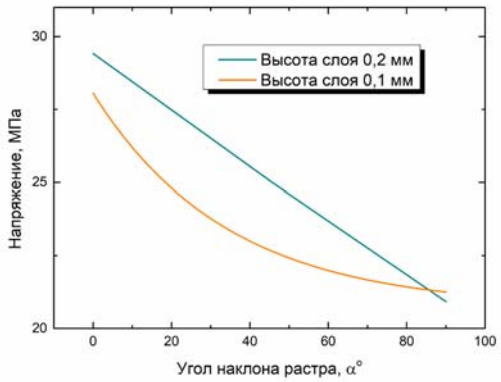


Рис. 6. График зависимости напряжения, выдерживаемого образцом, от изменения угла наклона растра

Из приведенных выше графиков можно сделать выводы, что образцы, напечатанные с углом наклона растра 0°, обладают лучшими физико-механическими свойствами по сравнению с образцами с углом наклона 45° и 90°. Ниже на рис. 7. приведен график средних значений измеренной пористости, все образцы с плотностью заполнения 100%.

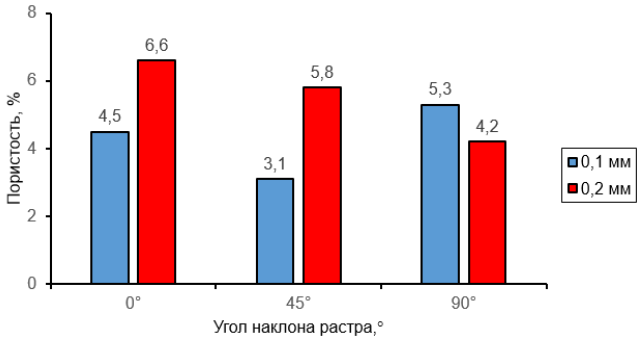


Рис. 7. Средние значения пористости

На рис. 8. представлен график для образцов разной плотности заполнения.

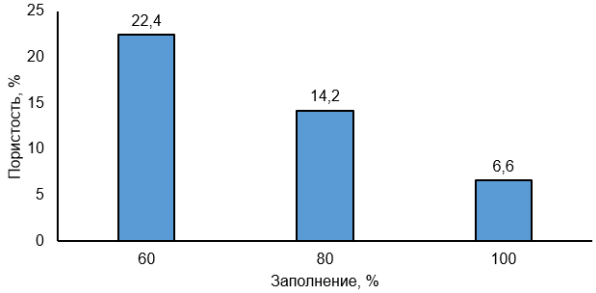


Рис. 8. Средние значения пористости для образцов с разным заполнением

Из представленных выше результатов можно судить, что в независимости от угла растра или высоты слоя пористость находится в одном диапазоне. Существенную же разницу оказывает плотность заполнения образцов, чем она меньше, тем пористость больше. При 60% заполнения образцы демонстрируют наибольший показатель пористости, при 80% пористость меньше, но наилучшие показатели при 100 % плотности заполнения, что следует учитывать при выборе этих параметров. Образцы напечатанные с плотностями заполнения 60% и 80% выдерживают более низкие нагрузки, чем с 100%. Для экономии времени и используемого филамента можно использовать параметры печати с 80% заполнения.

Выводы. В работе на примере образцов напечатанных из пластика ABS рассмотрено влияние режимов FDM-печати на физико-механические свойства напечатанных образцов. Установлено, что наилучшие физико-механические свойства имеют образцы, напечатанные с продольной ориентации нитей (угол наклона растра 0°), за которыми следует группа образцов с углом наклона растра 45°. Наиболее низкие показатели механических свойств демонстрируют образцы, напечатанные с углом наклона растра 90°, что связано с тем, что нагрузка при испытаниях прикладывается в поперечном направлении относительно укладки нитей. Для обеспечения лучших показателей пористости, и, следовательно, прочностных свойств необходимо задавать максимальную плотность заполнения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке комитета Тульской области по науке и инноватике в рамках соглашения № 10 от 07.09.2022.

Список литературы

1. Different Types of Additive Manufacturing [Электронный ресурс] URL: https://www.carbon3d.com/resources/blog/the-7-types-of-additive-anufacturing (дата обращения: 10.05.2023).

2.Stratasys. Available [Электронный ресурс] URL: http://www.stratasys.com/3dprinters/technologies/fdmtechnology (дата обращения: 10.05.2023).

3. Antonella Sola. Fused Deposition Modeling of Composite Materials / Antonella Sola, Adrian Trinchi // Woodhead publishing series in composites science and engineering. Elsevier, 2022. 460 p.

4. Wang J. A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling / J.Wang, H.Xie, Z.Weng, T.Senthil, L.Wu // Materials and Design. 2016. V. 105. № C. P. 152-159.

5. Хаширов А.С. Влияние технологических режимов FDM-печати на свойства изделий из полифениленсульфона и его композита с дискретным углеродным волокном: дис. Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2019.

Говоров Иван Сергеевич, магистрант, vanya.govorov.2001@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Потапов Андрей Алексеевич, аспирант, младший научный сотрудник, potapov-kristall@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Веневцев Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, venevtsev@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STUDY OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PRINTED PRODUCTS FROM PRINTING PARAMETERS

I.S Govorov, A.A. Potapov, A.Y. Venevtsev

The work examines the influence of 3D printing parameters on the physical and mechanical properties of printed products. Samples with a filling of 60,80,100%, with different combinations of raster inclination angles (0°, 45°, 90°) and layer heights of 0.1 and 0.2 mm were studied.

Key words: materials for 3D printing, adhesion, layers, porosity, printing parameters, FDM printing.

Govorov Ivan Sergeevich, master, vanya.govorov.2001@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Potapov Andrey Alekseevich, postgraduate, junior researcher, potapov-kristall@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Venevtsev Alexey Yurievich, candidate of technical science, docent, venevtsev@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 007.93
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-451-452

МЕТОДОЛОГИЯ ОТБОРА СОТРУДНИКА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

И.А. Матыцина, Л.А. Коробова

В данной статье представлены результаты исследования определения пригодности соискателя для приема на работу с применением инструмента нечеткой логики. Апробация результатов проводились при помощи анкетного опроса будущего сотрудника по 9 критериям. Анализ и выявление результатов профпригодности проводились с использованием математических методов на основе логических правил вывода (по Мамдани).

Ключевые слова: математический анализ, нечеткая логика, выбор сотрудника, оценка, лингвистические переменные.

Методология отбора сотрудника при приеме на работу на основе нечеткой логики является инновационной и эффективной стратегией, которая позволяет учитывать множество различных факторов и обеспечить оптимальное сопоставление между требованиями вакансии и качествами кандидата.

На любом заводе пищевой, химической [1] или другой промышленности довольно возникает потребность в подборе нового персонала в связи с увольнением работников, расширением организации, увеличением предоставляемых услуг и др. При этом резервных кадров в организации, как правило, нет. Если сотрудник уходит из организации, то его работу выполняет другой сотрудник, замещая его в свои выходные дни, что сказывается на качестве его работы при увеличенных нагрузках и организация может понести убытки [2]. При выборе сотрудника на должность химик-технолог, часто используется метод анкетирования, который позволяет получить информацию о навыках, знаниях и опыте кандидатов. Однако эта информация может быть не достаточно объективной и требует дополнительного анализа и интерпретации.

Первоначально, при устройстве на работу, нового сотрудника ожидает стажировка. На ее проведение необходимо затратить не только финансы, но и трудовые ресурсы. Ведь сотрудник проводящий стажировку тратит рабочее время на обучение, а не на выполнение своих обязанностей. Отсюда вытекает необходимость оценивания будущего работника не только обособленно, но и в сравнении с другими кандидатами на предлагаемую должность. Самый оптимальный вариант - это отсеивание неподходящих кандидатов на стадии заполненного анкетного опроса [3].

При подборе персонала для трудоустройства на работу важно правильно оценить кандидата, его качества, навыки и другие параметры [4]. Эти показатели должны быть обоснованы поддержкой достоверных данных, подтянутых из различных источников, а не только со слов предполагаемого претендента на вакантное место в компании, так как сам претендент может быть необъективен в оценивании собственных способностей и характеристик, а также может целенаправленно завышать свои показатели или наоборот недооценивать свои способности. Во избежание неточности оценивания претендента следует ответственно подходить к исследованию всех характеристик, использовать достоверную информацию, зафиксированную в документальном виде и проверенные методики управленческого менеджмента [5].

Так в пищевой промышленности или на химическом предприятии сотрудник, занимающий должность химик-технолог должен выполнять следующие функции:

- апробирование и знакомство с новыми образцами производства;
- выявление химического состава;
- проведение анализа свойств вещества;
- рассчитывать расходы и отходы на предприятии при химическом анализе;
- знания и умения правильно утилизировать все отходы химического (пищевого) производства.

Первоначальной задачей химика-технолога является контроль поступающего сырья и всех расходных материалов, необходимых для работы на предприятии. Затем, обязательной является проверка качества конечного образца готовой продукции и определение его соответствия заявленным критериям [6].

Обычно для подбора персонала проводится анкетирование, которое позволяет получить общие сведения о кандидатах, собеседование руководителя с претендентом для формирования личностной оценки, учитывается мнение коллегиального совета. Такое оценивание не сведено к общему виду представления, в результате может оказаться не нечетко сформулированный результат общего оценивания. Отсюда следует, что предприятиям необходим организованный способ объединения всех показателей (указанных в анкетном опросе), который будет рассматривать и учитывать все нюансы специфики работы предприятия и будущего сотрудника. Из выше сказанного следует вывод, что простая дискуссия (собеседование) или простой опрос (анкета) не всегда помогут сделать правильный выбор, при подборе сотрудника [7].

Так как анализ оценки будущего персонала имеет некоторую степень неопределенности, необходимо разработать математический аппарат, основанный на нечеткой логике [8].

Нечеткая логика – это подход, разработанный с целью анализа нечеткой информации и неопределенности в принятии решений. В контексте отбора сотрудников, нечеткая логика позволяет более гибко и объективно оценить качества и навыки кандидатов, учитывая их комплексность и многогранность.

Основной принцип методологии заключается в применении нечетких множеств для описания требований вакансии и соответствия каждого кандидата с этими требованиями. Нечеткие множества определяют степень принадлежности каждого кандидата к требованиям вакансии в виде числовых значений от 0 до 1, отражая степень соответствия.

Важным шагом в этом процессе является определение критериев отбора, которые могут включать такие параметры, как профессиональные навыки, личностные качества, опыт работы и образование. Каждому из этих критериев приписывается определенная важность или весовой коэффициент, отражающий их относительную значимость.

Для оценки каждого кандидата используются лингвистические переменные, которые представляют различные степени соответствия между требованиями вакансии и качествами кандидатов. Эти переменные могут быть определены как низкий, средний и высокий уровни соответствия для каждого критерия.

Затем, с помощью математических алгоритмов и формул, производится комбинирование и агрегирование лингвистических переменных, что позволяет получить итоговую оценку соответствия каждого кандидата требованиям вакансии. Эта оценка может быть выражена в виде числовых значений от 0 до 1.

Основным преимуществом методологии отбора на основе нечеткой логики является возможность учесть важность каждого критерия и дать приоритет более значимым качествам и навыкам. Также, данный подход способствует справедливому оцениванию кандидатов, основываясь на объективных критериях и учете неопределенности и комплексности.

Рассмотрим процедуру оценки анкетирования сотрудника на примере химического предприятия. Анкетирование проводилось на должность химика технолога. Для обработки результатов использована нечеткая логика [9, 10].

1. Формируем функцию цели *f*, объясняющую связь входных и выходных переменных системы оценки персонала (формула 1):

$$f(x_1, x_2, ..., x_n) = K(y_1, y_2, ..., y_m) \quad (1)$$

где K – функция компетентности, x_1-x_n – входные переменные системы оценки, y_1-y_m – выходные переменные.

2. Проводим описание оцениваемых показателей. Применяем для этого лингвистические переменные x_n, где n – количество оцениваемых показателей. Данный список зависит от основных требований к должности химик-технолог.

При формировании функций цели, необходимо отталкиваться от реалистичных показателей. Как правило, эти требования фиксируются в нормативных документах организации [11, 12].

При подборе сотрудника на должность химик-технолог на предприятия химической или пищевой промышленности необходимо учитывать требования: насколько опытен сотрудник в производственной сфере, его возраст и состояние здоровья, соответствие уровню образования, личные и профессиональные качества, знания и умения анализа химического состава веществ, рассчитывать расходы и отходы, умение утилизировать производственные отходы [4]. Необходимо учитывать, что список критериев отбора сотрудника необходимо составлять так, что бы в нем были отражены наиболее значимые стороны его деятельности, следовательно, список вопросов (анкета) не является полным. Это усложняет точность оценивания, и как итог, влечет увеличение получения ошибки при принятии решения по рассматриваемому кандидату.

3. Для лингвистических переменных x_n формируем терм-множества в соответствии с логическим смыслом переменной. Проводим подбор для каждой переменной функции принадлежности A_{in} и определяем базовый набор термов для каждой лингвистической переменной x_n, в зависимости от оцениваемой функции f [12, 13]. Для этого используем разные результаты шкал отношений. Для представления качественных показателей, таких как, общительность, внешний вид и т. д., применяем три термина: «Низкий», «Средний», «Высокий», определяемые гауссовыми функциями принадлежности. В случае рассмотрения личных качеств используем диапазон значений x_n=[1;3], т.к. на практике в большинстве тестирований и экспертных оценок данных показателей используется 3–балльная система. Далее выделяем необходимое количество термов и задаем их функциями принадлежности A_{in}, где i– количество термов n-го входного показателя.

4. Формируем терм-множества выходных переменных y_m в диапазоне [0;100] и задаем их функциями принадлежности B_{jm}.

На данном этапе формируем терм-множество выходных переменных y_m. Самый лучший вариант - множество y_m=[0;100]. Так как выходные переменные отражают уровень соответствия профпригодности претендента на должность химика-технолога. В выводе удобнее использовать процентное значение переменной, т.е. множество [0;100]. Затем определим термы выходных переменных и зададим их функции принадлежности B_{jm}, где j– количество термов m-го выходного показателя [11, 12]. Для этого применяются универсальные функции принадлежности Гауссова типа, включающие три терма: "Нет", "Может быть" и "Да", описываемые следующей формулой (2):

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \dfrac{c - x}{c_1 - c}, & \text{если} \quad c \le x \le c_1 \qquad \text{Да;} \\ 1, & \text{если} \quad c_1 \le x \le c_2 \qquad \text{Может быть;} \\ 0, & \text{если} \quad \textit{иначе} \qquad \text{Нет.} \end{cases} \quad (2)$$

где c, c_1, c_2 и c_3 — числа, характеризующие грани перехода критерия оцениваемого параметра.

5. Формирование базы правил. Для данного этапа требуется разработать набор правил, которые отражают требования к определенным должностям на предприятии. Правила задать в следующем формате: если x_1 есть A_1 и x_2

есть A_2 и... и x_n есть A_i, то y_1 есть B_1 и y_2 есть B_2 и y_m есть B_j, где A и B – термы лингвистических переменных, которые определяются в диапазоне входных значений x и выходных значений y. При этом n – количество входных переменных (оцениваемых показателей), m - количество выходных переменных (долж ностей) [14,15].

6. Нечеткий логический вывод по способу Мамдани и Сугено. Наиболее часто используемыми методами нечеткого вывода являются методы Мамдани и Сугено [16]. При использовании метода Мамдани значения выходных переменных представлены нечеткими термами, а при использовании метода Сугено они определяются как линейная комбинация входных переменных. В данном алгоритме невозможно представить выходные переменные (степени соответствия должностям) в виде линейной комбинации входных переменных (характеристик персонала), поэтому наиболее оптимальным решением является использование логического вывода по методу Мамдани.

8. Получение выходных значений y_n. Выходные значение y_n представлены в процентах, отражающих уровень профессиональной пригодности претендента для различных должностей или групп должностей в организации.

Рассмотрим процесс программного решения для выбора кандидата на должность химика-технолога (рис. 1).

K – уровень компетентности	x_1 – уровень образования
	x_2 – опыт работы в данной сфере
	x_3 – коммуникабельность
	x_4 – характер/поведение
	x_5 – возраст
	x_6 – внимательность
	x_7 – пользователь ПК
	x_8 – знание химического анализа
	x_9 – общительность

Рис. 1. Уровень компетентности

Результативность по каждой компетенции будет ранжироваться согласно таблице.

Входные и выходные переменные системы оценки химика-технолога

Обозначение переменной	Наименование переменной	Терм множество	Варианты ввода
x_1	Уровень образования	Школа СПО ВО	1 - школа 2 - СПО 3 - ВО
x_2	Опыт работы в данной сфере	Низкий Средний Высокий	1 - Низкий [0-3] 2 - Средний [4-12] 3 - Высокий [13-45]
x_3	Коммуникабельность	Низкий Средний Высокий	1-3 баллов
x_4	Характер/поведение	Низкий Средний Высокий	1-3 баллов
x_5	Возраст	Молодой Взрослый Возрастной	1 - Молодой [18-23] 2 - Взрослый [24-45] 3-Возрастной [45-60]
x_6	Внимательность	Низкий Средний Высокий	1-3 баллов
x_7	Пользователь ПК	Низкий Средний Уверенный	1-3 баллов
x_8	Знание химического анализа	Низкий Средний Высокий	1-3 баллов
x_9	Общительность	Низкий Средний Высокий	1-3 баллов

В данной работе рассматривается анализ данных на прием сотрудника химик-технолог.
Опираясь на уровень компетенций, правила вывода будут выглядеть следующим образом.

$$П1: ЕСЛИ\ x_1 \geq 2\ \&\ x_2 \geq 3\ \&\ x_3 \geq 2\ \&\ x_4 \geq 2\ \&\ x_5 \geq 2\ \&\ x_6 \geq 2\ \&\ x_7 \geq 2$$

$$\&\ x_8 \geq 2\ \&\ x_9 \geq 2, ТО\ работник\ подходит\ на\ должность\ без\ обучения;$$

$$П2: ЕСЛИ\ x_1 \geq 2\ \&\ x_2 \leq 2\ \&\ x_3 \geq 2\ \&\ x_4 \geq 2\ \&\ x_5 \leq 3\ \&\ x_6 \geq 2\ \&\ x_7 \leq 2$$

$$\&\ x_8 \leq 3\ \&\ x_9 \geq 2, ТО\ работник\ подходит\ на\ должность\ с\ дополни -$$

тельным периодом обучения;

$$\text{П3}: \text{ЕСЛИ } x_1 < 2 \,\&\, x_2 < 2 \,\&\, x_3 \geq 2 \,\&\, x_4 < 2 \,\&\, x_5 \leq 3 \,\&\, x_6 < 2 \,\&\, x_7 < 2$$

$$\&\, x_8 < 2 \,\&\, x_9 < 2, \text{ТО работник не подходит на должность.}$$

Графические представления функций принадлежности по правилам П1, П2 и П3 приведены на рис. 2, 3 и 4 соответственно.

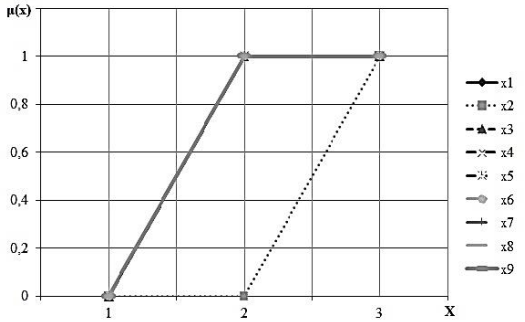


Рис. 2. Функция принадлежности правила 1: x - значение терм – множества «работник подходит на должность химик-технолог без обучения», в баллах; μ(x) - степень принадлежности

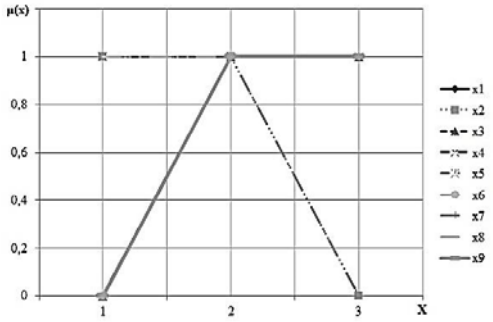


Рис. 3. Функция принадлежности правила 2: x - значение терм – множества «работник подходит на должность химик-технолог с дополнительным периодом обучения», в баллах; μ(x) - степень принадлежности

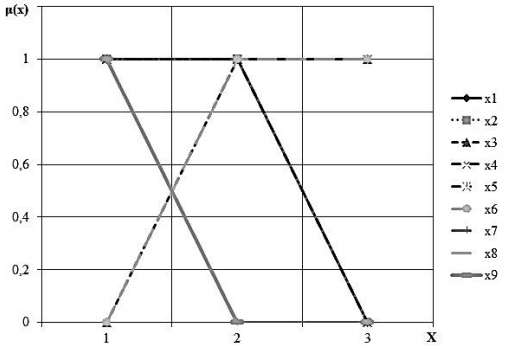


Рис. 4. Функция принадлежности правила 3: x - значение терм – множества «работник не подходит на должность химик-технолог», в баллах; μ(x) - степень принадлежности

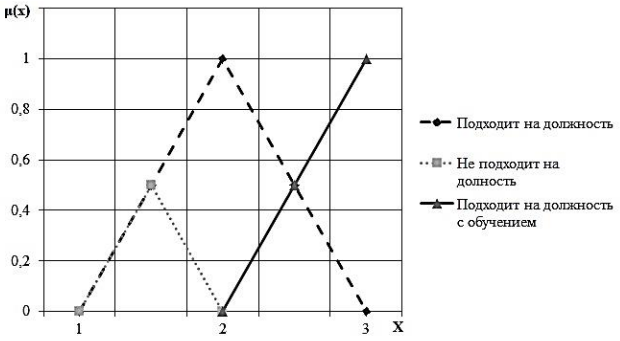


Рис. 5. Агрегируемая функция принадлежности: x - значение терм – множества, в баллах; μ(x) - степень принадлежности

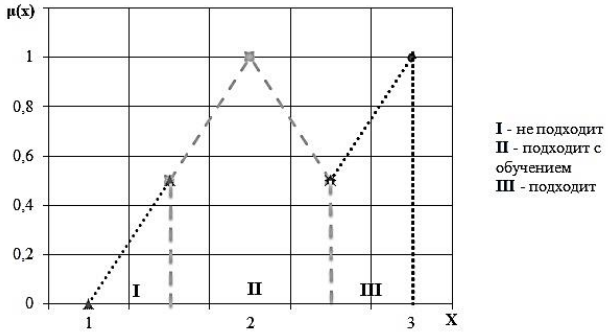


Рис. 6. Итоговый вывод

Агрегируя полученные функции принадлежности, получаем следующую функцию принадлежности (рис. 5).

Проведем *активизацию* в системе нечеткого вывода. Данный процесс включает в себя определение степени истинности каждого критерия, включенного в логическое высказывание, составляющих общее ядро всех нечетких правил вывода. Для принятия решение о выборе кандидата на должность химика-технолога строим функцию принадлежности итогового вывода (рис. 6).

Для принятия решения о квалификации претендента по системе оценки определяем среднее значение претендента по оценочной шкале (3):

$$x_{\text{итог}} = \frac{\sum_{k=1}^{s} x_k}{n}, \tag{3}$$

где k - номер вопроса в анкете, s =9 - общее количество вопросов.

Полученное значение необходимо проанализировать в сравнение с агрегированной функцией принадлежности по рисунку 5. Итоговое решение принимается в соответствии со следующими правилами (ПрИВ1, ПрИВ2, ПрИВ3).

$$\text{ПрИВ1}: \text{ЕСЛИ } 1 \le x_{\text{итог}} \le 1{,}5, \text{ ТО работник не подходит на должность;}$$

$$\text{ПрИВ2}: \text{ЕСЛИ } 1{,}5 \le x_{\text{итог}} \le 2{,}5, \text{ ТО работник подходит на должность}$$

с дополнительным периодом обучения;

$$\text{ПрИВ3}: \text{ЕСЛИ } 2{,}5 \le x_{\text{итог}} \le 3, \text{ ТО работник подходит на должность.}$$

Базируясь на предложенных правилах итогового вывода руководство компании, может оптимизировать использование, как материальных, так и трудовых затрат сотрудников. Данный метод отбора сотрудников позволяет уменьшить количество неквалифицированных сотрудников, что в свою очередь позволит усовершенствовать отбор сотрудников, поможет избежать ошибок и сократить затраты компании.

В заключение, методология отбора сотрудника на основе нечеткой логики является одним из эффективных инструментов, позволяющих лучше учесть множество факторов при принятии решений о приеме на работу. Это справедливый и объективный подход, который помогает выбрать наиболее подходящих кандидатов на основе их соответствия требованиям вакансии и применения математического анализа.

Список литературы

1. Зуева Н.В., Веретенников С.А., Новикова И.В. Переработка побочных продуктов спиртового производства с получением изобутилового спирта // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. 84(4). С. 76-79.

2. Анализ химического состава и свойств основных и побочных продуктов при реализации новых технологий получения этанола / Н.В. Зуева, Г.В. Агафонов, И.Ю. Лукинова, А.Н. Долгов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 3 (85). С. 71-77.

3. Коробова Л. А., Саввина Е. А., Мочалова Д. А. Анализ проблем и тенденций развития в области информационных систем подбора персонала химического предприятия // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2021. № 1(23). С. 18-23. – EDN YINJPK.

4. Bioprocessing of wheat to produce food and technical products / N.V. Zueva, G.V. Agafonov, T.I. Romanyuk, A.E. Chusova, A.N. Yakovlev, S.A. Veretennikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh. 2021. P. 022024. – DOI 10.1088/1755-1315/640/2/022024. – EDN OHSEDR.

5. Понкин И.В., Лаптева А.И. Методология научных исследований и прикладной аналитики : учебник. Москва : Буки Веди, 2022. 754 с.

6. Purification and investiga-tion of physico-chemical properties of β-glucanase / A.N. Yakovlev, S.F. Yakovleva, G.V. Agafonov, T.I. Romanyuk, N.V. Zueva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. conference proceedings. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. С. 22057.

7. Вешнева И.В. Математические модели в системе управления качеством высшего образования с использованием методов нечеткой логики: Монография. Саратов: «Саратовский источник», 2010. 187 с.

8. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. Москва : Мир, 1976. 168 с.

9. Abramov G., Korobova L., Matytsina I. Development of algorithm for analysis of sound fragments in medical information systems // Journal of Physics: Conference Series. Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems. 2020. С. 012095. EDN XORZMK.

10. Korobova L.A., Matytsina I.A. The use of logical-linguistic apparatus to describe the functioning of medical systems // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 52020. EDN LJMCUE.

11. Оценка потребностей в персонале для проекта обслуживания программного обеспечения с помощью моделирования очередей / Г. Антониоль, А. Чимитиле, Г. А. Ди Лукка, М. Ди Пента // Труды IEEE по разработке программного обеспечения. 2004. №30. С. 43-58.

12. Грачев М.И., Бурлов В.Г. Математическое моделирование в социальных и экономических системах // T-Comm. 2021.

13. Abramov G., Korobova L., Matytsina I. Development of algorithm for analysis of sound fragments in medical information systems // Journal of Physics: Conference Series : Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems, Voronezh. 2020. P. 012095. DOI 10.1088/1742-6596/1479/1/012095. EDN XORZMK.

14. Сильва, Л.С. Модель принятия решений о распределении человеческих ресурсов в области информации». системные проекты // Международный журнал управления проектами. 2013. №3. С. 100-108.

15. Баллестерос-Перес П., Гонсалес-Крус М.С., Фернандес-Диего М. Распределение человеческих ресурсов управление несколькими проектами с использованием социометрических методов // Международный журнал управления проектами. 2012. №30. С. 901-913.

16. Mamdani E. H. Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controller // Int.J. Man-Machine Studies. 1976. Vol. 8. P.669-678.

Матыцина Ирина Александровна, канд. техн. наук, доцент, irina210390@mail,.ru, Россия, Воронеж, Воронежский филиал Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,

Коробова Людмила Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, lyudmila_korobova@mail.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный университет инженерных технологий

METHODOLOGY FOR SELECTION OF EMPLOYEES BASED ON FUZZY LOGIC

I.A. Matytsina, L.A. Korobova

This article presents the results of a study of determining the suitability of an applicant for employment using a fuzzy logic tool. The results were tested using a questionnaire survey of the future employee according to 9 criteria. Analysis and identification of professional suitability results were carried out using mathematical methods based on logical rules of inference (according to Mamdani).

Key words: mathematical analysis, fuzzy logic, employee selection, assessment, linguistic variables.

Matytsina Irina Aleksandrovna, candidate of technical sciences, docent, iri-na210390@mail,.ru, Russia, Voronezh, Voronezh branch of the State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova,

Korobova Lyudmila Anatolyevna, candidate of technical sciences, docent, lyudmila_korobova@mail.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State University of Engineering Technologies

УДК 621.8 + 06
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-456-457

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

А.Е. Хачкинаян

В статье представлен материал исследования износостойкости коленчатых валов и шатунов двигателей транспортно-технологических машин, эксплуатируемых на строительных объектах Ростовской области. Рассмотрены условия эксплуатации коленчатых валов и шатунов, приведены основные факторы, влияющие на интенсивность износа шеек коленчатых валов и отверстий головок шатуна, выявлены основные неисправности и дефекты коленчатых валов и шатунов, построены эмпирические и теоретические зависимости распределения износа шатунных и коренных шеек коленчатого вала, разработаны маршрутные технологии восстановления шатунов, учитывающие их характерные дефекты и предложены мероприятия по уменьшению деформации нижней головки шатуна.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, шатун, шейка, подшипник, вкладыш, коленчатый вал, износ, надёжность, восстановление, технология, ресурс.

В процессе эксплуатации в двигателях внутреннего сгорания возникают неисправности, ухудшающие их техническое состояние и приводящие к отказам. Исследованиями установлено, что неисправности узлов и механизмов двигателей внутреннего сгорания по конструктивным и производственным факторам возникают редко. Основным фактором появления неисправностей в двигателях внутреннего сгорания является износ деталей, сопровождающийся изменением размеров, формы и взаимного расположения деталей в сопряжениях. Уменьшение износа деталей машин и повышение их эксплуатационных свойств является актуальной проблемой, частью которой является повышение долговечности двигателей внутреннего сгорания, распространение которых во всех отраслях народного хозяйства непрерывно увеличивается.

Коленчатый вал двигателя является ответственной деталью, от износостойкости и прочности которого зависит надежность и долговечность двигателя. В последнее время значительное число коленчатых валов изготовляются из специальных высокопрочных модифицированных чугунов и легированных сталей.

В процессе работы двигателя коленчатый вал воспринимает периодически действующие нагрузки от давления газов, сил инерции возвратно-поступательно движущихся масс кривошипного механизма и постоянно действующими центробежными силами. Усилия, действующие на вал, вызывают в нем деформации скручивания, изгиба, сжатия и растяжения. В результате этого коленчатый вал имеет следующие основные неисправности [1–3]: износ шатунных и коренных шеек по длине и окружности; прогиб коленчатого вала; износ резьбы под храповик; износ отверстий во фланце под болты крепления маховика и под установочные пальцы или направляющие шпильки; износ отверстий под шарикоподшипники ведущего вала сцепления.

К основным факторам, определяющим интенсивность износа шеек коленчатых валов, относятся [4–6]: качество материала коленчатого вала и сопрягаемого с ним подшипника; термическая обработка и твердость рабочей поверхности шейки; шероховатость поверхности; исходная макрогеометрия шеек вала; качество и условия смазки; удельное давление на рабочую поверхность; режим работы двигателя; климатические условия эксплуатации.

Вследствие износа шеек и подшипников коленчатого вала нарушается первоначальный зазор между ними, что ведет к падению давления в системе и появлению стуков в двигателе. Все это может вызвать недопустимый износ шеек и расплавление подшипников коленчатого вала.

Основными критериями ресурса коленчатого вала до первого ремонта являются интенсивность износа шеек вала и вкладышей и предельный зазор в сопряжении «шейка вала–вкладыш», при котором сохраняется жидкостное трение.

Зная минимальное число оборотов коленчатого вала, при которых обеспечивается жидкостное трение, можно выбирать рациональные методы управления машиной в конкретных условиях эксплуатации.

Проведенные исследования показали, что чугунные валы, установленные на тракторных двигателях, значительно превосходят по износостойкости и равномерности износа стальные валы.

Установлено, что суммарный износ при работе двигателя со стальным валом примерно в два раза выше, чем с чугунным валом. Износ вкладышей в обоих случаях идентичен.

Чугунные коленчатые валы обладают высокой усталостной прочностью, сравнительно высокой циклической вязкостью, износостойкостью, хорошими литейными свойствами и легко обрабатываются на станках. Исследованиями установлено [2, 3], что при изотермической закалке на троостито-ферритную структуру еще больше повышаются физико-механические свойства чугунных коленчатых валов.

Значительное влияние на процесс приработки и износостойкость деталей двигателя оказывает шероховатость рабочей поверхности детали. Для каждой сопрягаемой детали существует оптимальная шероховатость рабочей поверхности. Предусматривается, что коренные шейки двигателей ЗИЛ-130 и ЯМЗ-236 после механической обработки должны иметь шероховатость поверхности 0,4 мкм.

Проведенное исследование шероховатости шеек коленчатых валов двигателей ЗИЛ-130 и ЯМЗ-236 позволило установить, что шероховатость коренных шеек в среднем по четырем двигателям ЗИЛ-130 после пробега 162 тыс. км составила 0,3…0,12 мкм, а шатунных 0,36…0,2 мкм [7].

У коленчатых валов двигателей ЯМЗ-236 после среднего пробега автомобилей 152,5 тыс. км коренные и шатунные шейки имели шероховатость поверхности в пределах 9-го класса [8].

Идеальные условия между подшипником и валом наблюдается разделении поверхностей сопрягаемых деталей слоем жидкости, минимальная толщина которой превышает сумму наибольших микронеровностей вала и подшипника.

Исследования, проведенные на Горьковском автозаводе и Заволжском моторном заводе, подтверждают, что высокая долговечность шатунных шеек и вкладышей двигателя ГАЗ-53 (по сравнению с двигателем ГАЗ-51 в пять раз) обусловлена обеспечением достаточных величин критической толщины масляной пленки в шатунных подшипниках на всех режимах работы двигателя, что зависит от выбора оптимальных конструктивных параметров сопряженных деталей [3].

Из гидродинамической теории трения и смазки известно, что для сопряжения «вал–подшипник» критическая толщина масляной пленки составляет

$$h_{\min} = \frac{55{,}5 \cdot 10^{-13} \cdot n_{\min} \cdot \eta \cdot l \cdot d^3}{P_{\text{м}} \cdot \Delta \cdot C},$$

где $n_{\min}$ – минимальное число оборотов коленчатого вала, при котором обеспечивается жидкостное трение, мин$^{-1}$; η – абсолютная вязкость масла в двигателе, кг$/$с$\cdot$см^2; l – длина шейки коленчатого вала, мм; d – диаметр шейки коленчатого вала, мм; $P_{\text{м}}$ – величина несущей способности масляного клина, мм; Δ – диаметральный зазор между шейкой и вкладышем, мм; C – коэффициент, равный $C = 1 + d/l$.

Решая это уравнение относительно минимального числа оборотов коленчатого вала $n_{\min}$, получаем [9, 10]

$$n_{\min} = \frac{P_{\text{м}} \cdot \Delta \cdot h_{\text{крит}} \cdot C}{55{,}5 \cdot 10^{-13} \cdot \eta \cdot l \cdot d^3},$$

Величина несущей способности масляного клина $P_{\text{м}}$ равна суммарной величине нагрузки на шатунную шейку $P_{\text{ш}}$.

Величина $P_{\text{ш}}$ является расчетным давлением и зависит от диаметра цилиндра $d_{\text{ц}}$, давления газа $P_{\text{ц}}$ и сил инерции P_l и $P_{i\text{ц}}$:

$$P_{\text{м}} = P_{\text{ш}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{п}}^2 \cdot P_{\text{ц}}}{4} + P_i - P_{i\text{ц}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{п}}$ – диаметр поршня двигателя, мм; P_i – сила инерции, поступательно движущихся масс, Н; $P_{i\text{ц}}$ – центробежная сила инерции, действующая на шатун, Н.

Пользуясь формулой (1), можно определить режимы работы двигателя, при которых будет обеспечиваться жидкостное трение в подшипниках коленчатого вала.

Из формулы (1) видно, что по мере износа шеек коленчатого вала и их подшипников диаметральный зазор будет увеличиваться, а условия смазки сопрягаемых деталей будут изменяться. Для обеспечения жидкостного трения необходимо повышать частоту вращения, но не выше требуемой по условиям эксплуатации.

Преобладающие скорости движения и частота вращения коленчатого вала обусловливаются насыщенностью транспортных средств, состоянием дорог, организацией движения транспорта.

Зная минимальное число оборотов коленчатого вала, при которых обеспечивается жидкостное трение, можно выбирать рациональные методы управления машиной в конкретных условиях эксплуатации. Например, при увеличении диаметрального зазора, можно применять масло повышенной вязкости, так как абсолютная вязкость масла находится в обратно пропорциональной зависимости от оборотов коленчатого вала.

Проведенные исследования позволили установить характер, закономерность и величины износа шеек коленчатых валов двигателей ЗИЛ-130 и ЯМЗ-236 в зависимости от пробегов. В результате установлено, что шейки валов по окружности и по длине изнашиваются сравнительно равномерно. В интервале пробегов 150…170 тыс. км у некоторых шатунных шеек наблюдается подплавление вкладышей и, как следствие, задир шейки. Основным фактором, влияющим на подплавление вкладышей, является недостаточное количество масла, подаваемого к подшипникам [9].

В ранее проведенных исследованиях, установлено, что задир шатунных шеек происходит по третьему кривошипу (по пятой и шестой шейкам) потому, что масло к ним поступает от наиболее теплонапряженного четвертого коренного подшипника [9].

Износ коренных шеек протекает равномерно, без задиров и нарушений рабочей поверхности шеек. После пробега автомобиля 162 тыс. км получены следующие результаты: средневзвешенная величина износа коренных шеек – 0,089 мм; интенсивность износа – 0,54 мкм/1000 км пробега; максимальный износ шатунных шеек – 0,101 мм; интенсивность износа шатунных шеек – 0,62 мкм/1000 км пробега.

В результате обработки статистических данных построены эмпирические и теоретические кривые распределения износа шатунных и коренных шеек, представленные на рис. 1.

Теоретические зависимости достаточно близко воссоздают полигон эмпирического распределения. Совпадение эмпирических и теоретических кривых распределения оценивалось по критерию согласия Пирсона. Подсчитанные величины критерия согласия Пирсона во всех случаях больше 0,05, что свидетельствует о хорошей согласованности принятого закона распределения.

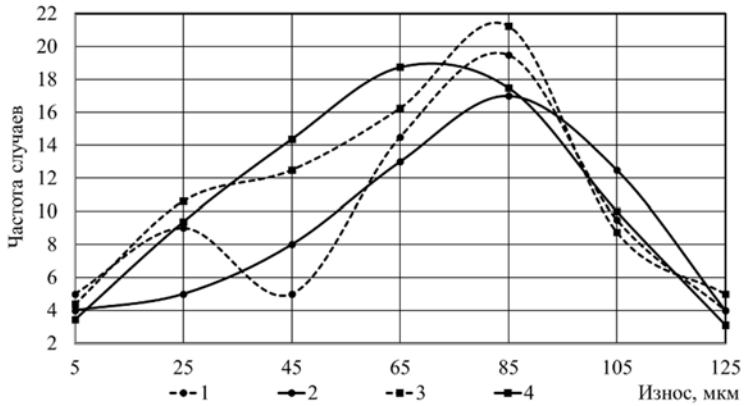


Рис. 1. Распределение износа шатунных (●) и коренных (■) шеек двигателя ЗИЛ-130 после среднего пробега 162 тыс. км: 1, 3 – эмпирические кривые; 2, 4 – теоретические кривые

Теоретическая кривая распределения износа шатунных шеек несколько смещена вправо (рис 1). Это указывает на интенсивное изнашивание шеек после пробега автомобилями 162 тыс. км.

При изучении характера и величин износа шеек коленчатого вала двигателей ЯМЗ-236 было установлено, что после пробега автомобилей 152,5 тыс. км состояние шеек как коренных, так и шатунных хорошее.

Среднемаксимальный износ коренных шеек по четырем двигателя составил 42,5 мкм, а шатунных – 53,6 мкм. Средняя интенсивность износа коренных шеек 0,27 мкм/1000 км пробега, а шатунных – 0,37 мкм/1000 км пробега.

При сопоставлении теоретического и фактического износа шатунных шеек наблюдается некоторое расхождение характера износа шейки по окружности. Износ шатунных шеек происходит, главным образом, в плоскости кривошипа и значительно меньше в плоскости, перпендикулярной кривошипу. Износ коренных шеек, как по окружности, так и по длине протекает сравнительно равномерно.

На основе статистических данных микрометража по износу шеек коленчатых валов двигателей ЯМЗ-236 построены кривые распределения (рис. 2). Распределение износа шатунных и коренных шеек свидетельствует о том, что теоретическая кривая довольно близко воспроизводит полигон экспериментального распределения. Поэтому, данные, полученные опытным путем, являются объективными для описания закономерности и величин износа шеек.

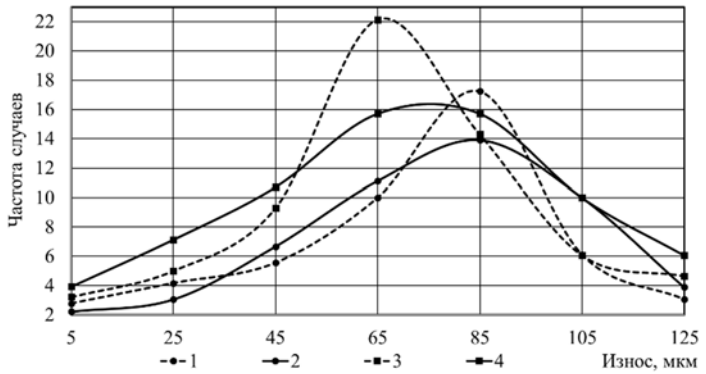


Рис. 2. Распределение износа шатунных (●) и коренных (■) шеек двигателя ЯМЗ-236 после среднего пробега 152,5 тыс. км: 1, 3 – эмпирические кривые; 2, 4 – теоретические кривые

Среднемаксимальная овальность шатунных шеек после пробега двигателя 152,5 тыс. км составила 0,18 мкм, а у коренных шеек только 12,5 мкм.

Исследование износов шеек коленчатых валов двигателей ЯМЗ-236, поступающих в капитальный ремонт на Ростовский агрегатный завод, позволило установить, что шейки валов, поступающих в ремонт первый раз, изнашиваются сравнительно равномерно. Шатунные шейки изнашиваются интенсивнее, чем коренные, так как работают в более тяжелых условиях эксплуатации. По окружности и длине шатунные шейки принимают соответственно эллиптическую и конусную формы. Шатунные шейки в 1,5…2 раза (на 30…50 %) больше изнашиваются, чем коренные [9].

Эллиптический износ шатунных шеек по окружности обусловлен неравномерной удельной нагрузкой, а по длине – неодинаковыми условиями смазки различных частей шейки по ее длине из-за несовершенства способа подвода смазки. В двигателях с несимметричными шатунами причиной неравномерности износа шатунных шеек по длине является несимметричность нижней головки шатунов. На всех двигателях, имеющих в коленчатых валах наклонные масляные каналы, наблюдается конусная форма износа шатунных шеек.

Во время вращения коленчатого вала вследствие износа шеек и подшипников, нарушается зазор между подшипником и шейкой вала. В результате этого в двигателе появляются стуки и падает давление в системе смазки, что вызывает недопустимый износ шеек вала и расплавление подшипников.

Основными критериями ресурса коленчатого вала до первого ремонта являются интенсивность износа шеек вала и вкладыша и предельный зазор между ними, при котором сохраняется жидкостное трение в этом сопряжении.

Пользуясь зависимостью, можно определить технический ресурс коленчатого вала до первого капитального ремонта

$$T = \frac{h_{\text{пред.}} - h_0}{\tau},$$

где T – средняя наработка до первого капитального ремонта, тыс. км; $h_{\text{пред.}}$ – предельный зазор между вкладышем и шейкой, мм; h_0 – номинальный зазор, мм; τ – средняя интенсивность износа сопряжения, мкм/1000 км пробега,

Расчетные ресурсы коленчатых валов двигателей ЗИЛ-130 и ЯМЗ-236 до первого капитального ремонта соответственно составляют 240 тыс. км и 321 тыс. км.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы об износе и ресурсе коленчатых валов:

1.Изучение коленчатых валов базовых двигателей ЗИЛ-130 и ЯМЗ-236 при использовании их на автомобилях позволило установить, что износостойкость коренных и шатунных шеек достаточно высокая.

2.Коренные и шатунные шейки изнашиваются сравнительно равномерно как по окружности, так и по длине.

3.Технический ресурс коленчатых валов превышает установленные нормы пробегов деталей до первого капитального ремонта.

В случае, когда размеры шеек вала ниже последнего ремонтного размера, вал целесообразно восстанавливать до номинального размера одним из следующих способов: автоматической наплавкой шеек под слоем легирующих флюсов; металлизацией напылением; электроимпульсной наплавкой в жидкости; твердым электролитическим осталиванием.

Шатуны современных двигателей штампуются в закрытых штампах из легированных или высокоуглеродистых сталей

В процессе работы двигателя шатун через поршень воспринимает следующие усилия [11, 12]: силу давления газов; силы инерции от вращательно-поступательно движущихся масс; силы инерции от качательного движения шатуна. Все это вызывает изгиб и скручивание стержня шатуна.

В процессе дефектовки шатунов при поступлении дизелей ЯМЗ в капитальный ремонт позволила выявить следующие характерные дефекты [13]: изгиб или скручивание шатуна; износ отверстия нижней головки; износ торцов нижней головки; ослабление посадки втулки верхней головки; износ отверстия во втулке верхней головки.

Наиболее часто встречающиеся сочетания характерных дефектов шатунов двигателей (объем выборки 30 двигателей – 240 шатунов) показаны в таблице.

Для восстановления шатунов разработаны четыре технологических маршрута, учитывающие их характерные дефекты [9]. Для составления типового технологического процесса восстановления шатуна двигателя ЯМЗ-238 целесообразна маршрутная технология по второму сочетанию дефектов, как наиболее часто встречающаяся.

1.Прессовая операция. Выпрессовать втулку из отверстия.
2.Слесарная операция. Править шатун.
3.Контрольная операция. Проверить параллельность осей нижней и верхней головок.
4.Контрольная операция. Проверить шатун на отсутствие трещин с последующим размагничиванием.
5.Слесарная операция. Проверить затяжку гаек шатунных болтов.
6.Гальваническая операция.
7.Токарная операция.
8.Фрезерная операция. Обработать последовательно фаски.
9.Слесарная операция. Запрессовать втулку новую.
10. Фрезерная операция. Фрезеровать паз во втулке.
11. Токарная операция. Расточить отверстие во втулке.
12. Контрольная операция. Проверить отверстие во втулке.
13. Шлифовальная операция. Поочередно шлифовать торцы нижней головки шатуна.

Сочетание характерных дефектов шатунов дизелей ЯМЗ-238

Сочетание дефектов	Дефекты					Частота встречающихся сочетаний
	1	2	3	4	5	
I	–	+	–	+	+	7
II	+	+	+	–	+	80
III	–	+	+	+	+	5
IV	–	–	–	–	+	6

Представляет интерес выбор оптимального варианта восстановления отверстия нижней головки шатуна, которое после длительной эксплуатации деформируется [14]: вследствие смятия шлицев стыков шатуна и его крышки, в результате нестабильности сопряжения крышки и шатуна при обработке отверстия нижней головки и ее демонтаже; из-за смещения крышки относительно шатуна в осевом направлении на величину зазора между фиксирующими поясками шатунного болта и отверстия в крышке и шатуне; из-за непараллельности образующих шлицев стыков оси отверстия нижней головки.

В ходе математической обработки статистических данных размеров отверстия нижней головки 240 изношенных шатунов дизелей ЯМЗ-238 установлено, что износ отверстия нижней головки шатуна следует нормальному закону с математическим ожиданием $\overline{M}(x) = -0{,}04$ и средним квадратическим отклонением $\sigma(x) = 0{,}075$ и описывается следующим уравнением [15, 16]:

$$f(x) = \frac{1}{0{,}075}\sqrt{2\pi}\cdot e^{\frac{-(x-0{,}014)^2}{0{,}01125}}.$$

Из всего объема выборки: 29,5 % шатунов имеют отклонения левее поля допуска $(x_i \prec EY)$; у 8,8 % шатунов отклонения попадают в поле допуска $(EY \le x_i \le ES)$; 61,7 % шатунов имеют отклонения правее поля допуска $(x_i \succ ES)$.

Наиболее часто в результате естественного износа происходит увеличение размера. Уменьшение отверстия вследствие пластических деформаций встречается гораздо реже и устраняется методом расточки.

Значительные деформации отверстия нижней головки шатунов обусловлены в основном технологическими факторами, связанными с изготовлением стыков шатуна и его крышки. С целью уменьшения деформации в технологический процесс вводится операция обжатия шлицев, что снижает деформацию в 1,7 раз. Другой технологической причиной, вызывающей деформацию, является непараллельность образующих шлиц стыков оси отверстия нижней головки, так как при окончательной обработке отверстия нижней головки невозможно базироваться на образующие шлицев стыков.

Для исключения влияния непараллельности образующих шлицев оси отверстия нижней головки необходимо с помощью тонкостенной втулки зафиксировать крышки в плоскости разъема при сохранении системы фиксации в поперечном направлении по шлицам крышки и шатуна. При фиксации крышки в осевом направлении с помощью втулки можно уменьшить деформацию отверстия нижней головки шатуна в 1,7 раза.

Исследованиями установлено, что двигатели отправляются в капитальный ремонт без учета специфики режимов и условий работы машин, а только на основании километров пробега и часов работы. Это ведет к недоиспользованию ресурса в среднем на 25 % и непроизводительным затратам государственных средств.

Используя методы диагностики, изучив механизм износа основных элементов двигателя и дифференцируя существующие нормативы, можно рационально разрешить проблему повышения срока службы двигателя и сократить расходы на ремонт.

Список литературы

1. Гурвич И.Б., Сыркин П.Э., Чумак В.И. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей. М.: Транспорт, 1994. 144 с.

2. Белоковыльский А.М. Надежность автомобильного транспорта: монография. Пенза: ПГУАС, 2018. 172 с.

3. Гурвич И.Б. Износ и долговечность автомобильных карбюраторных двигателей: диссертация … доктора технических наук. Горький, 1973. 320 с.

4. Шатерников М.В., Корчагин В.А., Шатерников В.С. Повышение надежности и долговечности двигателя ЯМЗ-240Н // Автотранспортное предприятие. 2014. № 7. С. 41–45.

5. Суранов Г.И. Триботехника. Повышение долговечности транспортных двигателей: монография. Ухта: УГТУ, 2011. 334 с.

6. Gilles T. Automotive engines: Diagnosis, Repair, Rebuilding. Sixth edition. Cengage Learning. 2010. 752 p.
7. Алексаньян И.М., Хачкинаян А.Е. Обоснование необходимости проведения капитального ремонта машин // Транспорт–2019: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / РГУПС. Ростов-на-Дону, 2019. С. 243–247.
8. Алексаньян И.М., Хачкинаян А.Е. Анализ причин низкого качества ремонта машин // Транспорт–2019: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. / РГУПС. Ростов-на-Дону, 2019. С. 248–251.
9. Алексаньян И.М., Дубенко О.Я. Износ деталей двигателей транспортно-технологических машин: монография. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2015. 139 с.
10. Алексаньян И.М., Нахимович И.А. Основы теории надежности: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2017. 116 с.
11. Денисов А.С., Кулаков А.Т. Обеспечение надежности автотракторных двигателей. Саратов: СГТУ, 2007. 422 с.
12. Калимуллин Р.Ф. Обеспечение долговечности двигателей автотранспортных средств эксплуатационным методом // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 4. С. 53–61. DOI: 10.25198/1814-6457.
13. Храмцов Н.В., Королев А.Е., Бай Р.Ф. Влияние конструкторско-технологических факторов на износостойкость автотракторных двигателей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 6–1. С. 127–131.
14. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / Ю.А. Кузнецов, И.Н. Кравченко, А.А. Севрюков, М.А. Глинский // Технология металлов. 2019. № 5. С. 34–40. DOI: 10.31044/1684-2499-2019-5-0-34-40.
15. Analysis of influencing factors that can cause errors in the application of modern methods of sliding bearing diagnostics in machine and electrical systems / Zegarac N.P. // Military Technical Courier. 2020. Vol. 68. P. 845-876. DOI: 10.5937/vojtehg68-27265.
16. Development of a method for determining the size of clearance in sliding bearings. Vojnotehnicki glasnik / Zegarac N.P. // Military Technical Courier. 2020. Vol. 68(3). P. 530–553. DOI: 10.5937/vojtehg68-26107.

Хачкинаян Амбарцум Ервандович, канд. техн. наук, доцент, ambarzum21@yandex.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Ростовский государственный университет путей сообщения

RESEARCH OF THE RELIABILITY OF PARTS OF THE CRANK MECHANISM OF ENGINES OF TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL MACHINES

A.E. Khachkinayan

The article presents research material on the wear resistance of crankshafts and connecting rods of engines of transport and technological machines operated at construction sites in the Rostov region. The operating conditions of crankshafts and connecting rods are considered, the main factors influencing the wear rate of crankshaft journals and connecting rod head holes are given, the main malfunctions and defects of crankshafts and connecting rods are identified, empirical and theoretical dependences of the wear distribution of crankshafts and crank journals are constructed shaft, route technologies for restoring connecting rods have been developed, taking into account their characteristic defects, and measures have been proposed to reduce the deformation of the lower head of the connecting rod.

Key words: internal combustion engine, connecting rod, journal, bearing, liner, crankshaft, wear, reliability, restoration, technology, resource.

Khachkinayan Ambarzum Ervandovich, candidate of technical sciences, docent, ambarzum21@yandex.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State Transport University

УДК 621.9.08
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-461-462

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНТРОЛЮ ДОПУСКОВ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ НА КИМ

С.М. Никольский

В настоящей статье рассмотрены допуски формы и расположения, их обозначения в соответствии с ГОСТ. Приведены рекомендации по контролю допусков формы и расположения на КИМ.

Ключевые слова: КИМ, допуск формы и расположения, измерения, элемент, точки.

На сегодняшний день координатно-измерительная машина (КИМ) — это одно из наиболее эффективных средств измерений, предназначенное для определения разнообразных геометрических характеристик изделия, в том числе отклонения формы и расположения поверхностей деталей различных типов и сложности.

Контроль геометрических допусков является достаточно распространенным явлением при измерении параметров изделий, т.к. они довольно часто встречаются в технологической документации.

В соответствии с ГОСТ 2.308-2011 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Указания допусков формы и расположения поверхностей» устанавливаются допуски, перечисленные на рисунке 1.

Контроль данных допусков осуществляется в соответствии с рекомендациями, разработанными опытным путем, в процессе эксплуатации КИМ. Внедрение их в измерительный процесс позволит избежать погрешностей, связанных с выбранным методом [1, 2]. Данные рекомендации представлены ниже.

Группа допусков	Вид допуска	Знак
Допуски формы	Допуск прямолинейности	
	Допуск плоскостности	
	Допуск круглости	
	Допуск цилиндричности	
	Допуск профиля продольного сечения	
Допуски расположения	Допуск параллельности	
	Допуск перпендикулярности	
	Допуск наклона	
	Допуск соосности	
	Допуск симметричности	
	Позиционный допуск	
	Допуск пересечения осей	
Суммарные допуски формы и расположения	Допуск радиального биения	
	Допуск торцового биения	
	Допуск биения в заданном направлении	
	Допуск полного радиального биения	
	Допуск полного торцового биения	
	Допуск формы заданного профиля	
	Формы заданной поверхности	

Рис. 1. Обозначения допусков формы и расположения

Допуск прямолинейности. Прямолинейность оценивает ошибку формы линии. Программное обеспечение КИМ определяет допуск прямолинейности для линии вычислением расстояния между двумя перпендикулярными точками, самыми дальними от линии, используя метод наименьших квадратов. Вычисление прямолинейности линии действительно, только если было измерено достаточное количество точек на линии, и если эти точки хорошо распределены вдоль линии. Чтобы определить прямолинейность конуса или оси цилиндра, элемент разделяется на несколько независимых окружностей на различной высоте и по нормали к конусу или оси цилиндра, и эти окружности измеряются. Линия тогда создается через центры измеренных окружностей, и требуется прямолинейность для этой построенной линии. Конечно, больше окружностей дает лучший результат прямолинейности (рисунок 2).

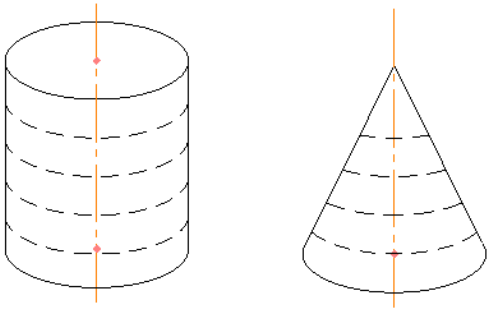


Рис. 2. Независимые окружности при оценке допуска прямолинейности

Допуск плоскостности. Плоскостность оценивает ошибку формы плоскости. Программное обеспечение КИМ определяет допуск плоскостности для плоскости вычислением расстояния между двумя самыми дальними точками, перпендикулярными плоскости, используя метод наименьших квадратов. Требование плоскостности плоскости значимо, только если было измерено достаточное множество точек на плоскости, и если эти точки хорошо распределены на поверхности. При измерении крайне важно, чтобы контролируемые точки были равноудалены от краев измеряемой плоскости.

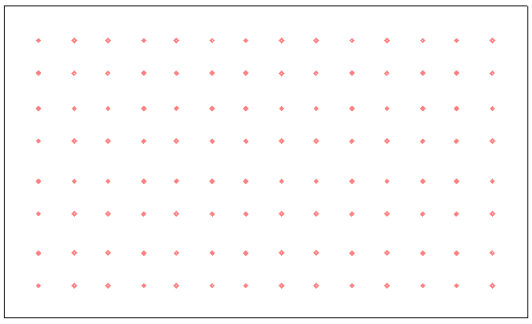


Рис. 3. Распределение точек при оценке допуска плоскостности

Допуск круглости. Круглость используется, чтобы оценить ошибку формы окружности. Программное обеспечение определяет допуск круглости для окружности вычислением расстояния между двумя перпендикулярными точками, самыми дальними от окружности, используя метод наименьших квадратов. Требование круглости окружности значимо, только если было измерено достаточное количество точек на окружности и если эти точки хорошо распределены на окружности.

Допуск цилиндричности. Цилиндричность используется, чтобы оценить ошибку формы цилиндра. Требование цилиндричности значимо, только если было измерено достаточное количество точек на цилиндре, и если эти точки хорошо распределены по окружности и высоте (рисунок 4). Стоит отметить, что чем больше высота измеряемого цилиндра, тем больше сечений рекомендуется контролировать.

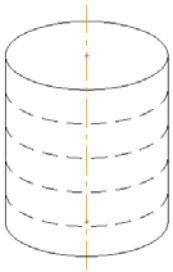


Рис. 4. Измерение сечений при оценке допуска цилиндричности

Допуск параллельности. Есть несколько возможных случаев оценки допуска параллельности:

1.Линия относительно референсной линии;

2.Линия относительно референсной поверхности;

3.Поверхность относительно референсной поверхности;

4.Поверхность относительно референсной линии.

В качестве линии выступает ось цилиндра или конуса. В каждом из случаев количество сечений и точек определяется исходя из размеров измеряемого элемента.

Допуск перпендикулярности. Есть несколько возможных случаев оценки допуска перпендикулярности:

1.Линия относительно референсной линии;

2.Линия относительно референсной поверхности;

3.Поверхность относительно референсной поверхности;

4.Поверхность относительно референсной линии

В качестве линии выступает ось цилиндра или конуса. В каждом из случаев количество сечений и точек определяется исходя из размеров измеряемого элемента.

Допуск наклона. Есть несколько возможных случаев оценки допуска перпендикулярности:

1.Линия относительно референсной линии;

2.Линия относительно референсной поверхности;

3.Поверхность относительно референсной поверхности;

4.Поверхность относительно референсной линии.

В качестве линии выступает ось цилиндра или конуса. В каждом из случаев количество сечений и точек определяется исходя из размеров измеряемого элемента.

Допуск соосности. Программное обеспечение КИМ автоматически отличает концентричность от соосности согласно элементам, используемым для вычисления. Если в качестве элементов используются окружности, то программное обеспечение делает допуск соосности (концентричности) автоматически. Концентричность требует присутствия компланарных элементов. Круговая зона допуска разграничена окружностью, имеющей центр в базовой точке. Если выбраны два осевых элемента, то программное обеспечение делает коаксиальный допуск автоматически. Коаксиальная зона допуска разграничена цилиндром, имеющим ось на референсной оси.

Допуск симметричности. Есть несколько возможных случаев оценки допуска симметричности:

1.Линия относительно референсной линии;

2.Линия относительно референсной поверхности;

3.Поверхность относительно референсной поверхности;

4.Поверхность относительно референсной линии

Позиционный допуск. Есть несколько возможных случаев позиционного допуска:

1.Для точки;

2.Для линии;

3.Для срединной плоскости или плоской поверхности

Важно отметить, что оценка позиционного допуска становится возможна лишь при наличии трехмерной модели измеряемого изделия.

Допуск пересечения осей. Данный вид допуска определяет насколько равноудалены между собой оси таких измеряемых элементов как цилиндр или конус. Для более точного результата измерений необходимо выполнять контроль соответствующего количества сечений и точек, как было рекомендовано выше.

Допуск радиального или торцового биения. Программное обеспечение КИМ позволяет выполнять оценку биения:

1.Круговое осевое биение для плоскости, конуса;

2.Круговое радиальное биение для окружности, конуса;

3.Круговое коническое биение для конуса.

Единичный осевой допуск торцового биения используется, чтобы оценить ошибку формы плоскости, исследованной на определенном диаметре. Бессмысленно определять единичный осевой допуск плоскости, если плоскость не была измерена с достаточным количеством точек, и точки не были правильно расположены. Рекомендуется использовать круговой метод, в котором центр должен примерно совпасть с референсной осью. Зона допуска ограничена двумя плоскостями, отдаленными друг от друга значением допуска t.

Единичный допуск радиального биения оценивает ошибку формы окружности, центрированной по референсной оси. Оценка единичного допуска имеет значение, только если Вы измерили достаточное количество точек на окружности и если эти точки распределены равномерно вокруг окружности. Зона допуска разграничена двумя окружностями, имеющими различие радиусы, равные допуску и имеющие референсную ось в центре.

Допуск полного радиального и торцового биения. Есть три типа полного биения: Осевое биение позволяет оценить дефект биения плоскости в ходе ее вращения вокруг базовой оси. Зона допуска — расстояние между двумя перпендикулярными плоскостями к референсной оси и содержащими плоскость с допуском. Круговое биение

оценивает дефект биения цилиндра во время его вращения вокруг базовой оси. Зона допуска — область между радиусами двух цилиндров внутри и снаружи цилиндра с допуском, где оба центрированы на референсной оси. Конические биение позволяет оценить дефект биения конуса во время его вращения вокруг базовой оси. Зона допуска — это нормальное расстояние до поверхности конуса между двумя коаксиальными конусами с базовой осью.

Допуск формы заданного профиля. Допуск формы заданного профиля используется, чтобы оценить ошибку формы сечения. Программное обеспечение вычисляет расстояние между двумя точками, самыми дальними от определенного сечения (перпендикулярное расстояние). Допуск формы — это двойное расстояние, разделенное на равные части на каждой стороне определенного сечения. Требование допуска формы заданного профиля значимо, только если было измерено достаточное количество точек на сечении, и если эти точки хорошо распределены по сечению.

Допуск формы заданной поверхности. Допуск формы заданной поверхности используется, чтобы оценить ошибку формы конуса, сферы или любой другой формы. Зона допуска – это расстояние по нормали до поверхности элемента, конуса, например, между двумя конусами, коаксиальными с одной базовой осью. Требование допуска заданной формы поверхности для конуса, сферы или любой другой поверхности значимо, только если было измерено достаточное количество точек на поверхности, конусе или сфере, и если эти точки хорошо распределены по элементу.

Список литературы

1. Никольский С.М., Соловьев С.И. Особенности различной трактовки результатов измерений, получаемых на ким и с помощью ручных средств измерений // Вестник науки. 2021. Т. 1. № 6-1 (39). С. 225-234.

2. Никольский С.М., Соловьев С.И. Источники погрешностей координатных измерений и способы минимизации их влияния // Вестник науки. 2021. Т. 1. № 6-1 (39). С. 217-224.

3. ГОСТ 2.308-2011. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Указания допусков формы и расположения поверхностей: Межгосударственный стандарт: дата введения 2012-01-01 / федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении" (ФГУП "ВНИИНМАШ"), Автономной некоммерческой организацией "Научно-исследовательский центр CALS-технологий "Прикладная логистика" (АНО "НИЦ CALS-технологий "Прикладная логистика"). 2012. 26 с.

Никольский Сергей Михайлович, инженер по метрологии, nikolsky.serge@yandex.ru, Россия, Тула, АО «АК «Туламашзавод»

RECOMMENDATIONS FOR CONTROLLING THE TOLERANCES OF THE SHAPE AND LOCATION ON THE CMM

S.M. Nikolsky

This article discusses the tolerances of shape and location, their designations in accordance with GOST. Recommendations are given for controlling the tolerances of the shape and location on the CMM.

Key words: CMM, tolerance of shape and location, measurements, element, points.

Nikolsky Sergey Mikhailovich, metrology engineer, nikolsky.serge@yandex.ru, Russia, Tula, JSC "Tulamashzavod"

УДК 629.113
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-464-465

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОДИФИКАЦИИ И МОНИТОРИНГА ДЕФЕКТОВ АВТОМОБИЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Н.А. Антонова, В.Н. Козловский, А.С. Клентак, Н.В. Козловский

В статье представлены результаты исследования отечественного опыта автомобильного производства в области организации и обеспечения кодификации и мониторинга дефектов автомобилей в эксплуатации.

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, автомобильное производство, кодификация проблем, эксплуатация.

Научно-техническая задача обеспечения деятельности по кодификации удовлетворенности потребителей в настоящее время приобретает высокий уровень актуальности, причиной чего является повышение значимости вопросов потребительской удовлетворенности качеством новых автомобилей в эксплуатации при оценке конкурентоспособности продукции, процессов автосборочного производства, а также высокой значимости имиджевой оценки автопроизводителя, существенно влияющей на потребительское поведение при покупке новой продукции [1, 2].

Такая же значимость для потребительской среды, в свое время была характерна и для вопросов, связанных с надежностью новой автомобильной техники, которая сегодня потребителями рассматривается как само собой разумеющаяся характеристика. Именно по этой причине, развивая и совершенствуя конструкции и материалы современных автомобилей, технологии производства, автопроизводители постоянно повышают гарантийный период, а также гарантийные обязательства перед потребителями. Да, надежность автомобиля по-прежнему важна, но она становится базовым фактором потребительской оценки качества. На передний край сегодня выходят вопросы обеспечения удовлетворенности. При этом инструментарий мониторинга удовлетворенности, с точки зрения технического содержания оценки качества продукции совершенствуется недостаточно. Это было показано при обзоре научных работ [3, 4].

Напрашивается вывод о том, что исследуя теорию и практику создания кодификаторов дефектов автомобилей, можно выделить факторы полезные для решения соответствующих задач при организации инструментов обеспечения мониторинга и управления удовлетворенностью потребителей качеством автомобилей в эксплуатации и прежде всего инструментов кодификации.

Исторически, многие инновации в области повышения эффективности и конкурентоспособности впервые реализовывались именно на предприятиях мирового автомобилестроения. Россия в этом плане не исключение. Волжский автомобильный завод (АВТОВАЗ) долгое время доминировавший на внутреннем автомобильном рынке, был законодателем не только в области автомобильной моды в нашей стране, но и в области организации деятельности направленной на повышение качества продукции на этапах жизненного цикла. Камский автомобильный завод (КАМАЗ), который был построен на 20 лет позже АВТОВАЗа, также стал признанным лидером в области инноваций [5, 6].

Во многом успешный опыт АВТОВАЗ и КАМАЗ перенимался другими крупными отечественными автопроизводителями и именно этот опыт во многом определил отраслевую практику выстраивания процессов мониторинга и управления качеством продукции машиностроения [7, 8].

Проводя исследование процессов СМК ОАО «АВТОВАЗ», можно заметить, что исторически в системе корпоративного управления предприятием всегда очень важная роль отводилась вопросам взаимодействия с потребителями. Вначале, через организацию качественного обслуживания и ремонта автомобилей в эксплуатации, а в последствии, начиная с 2000-х годов и через организацию маркетинговых исследований удовлетворенности клиентов. Обслуживание автомобилей на специальных автомобильных центрах автозавода рассматривается с двух функциональных сторон. С одной стороны, это процесс обеспечения эксплуатационной эффективности продукции, а с другой возможность получения объективных данных отражающих реальный уровень качества продукции. Одним из знаковых нормативных документов АВТОВАЗ, еще в 90-е годы 20 века, стал стандарт предприятия «Организация производства технического обслуживания и ремонта автомобилей на предприятиях фирменной сети техобслуживания автомобилей АО «АВТОВАЗ» внедренный в 1996г. Документ впервые в практике формализовал в рамках единого документа все основные направления деятельности в рамках обслуживания автомобилей находящихся в гарантийном периоде эксплуатации (рисунок 1).

Наиболее примечательными элементами стандарта, с точки зрения нашего исследования, являются многочисленные схемы организации взаимодействия внутри процесса технического обслуживания и ремонта автомобилей. Центральное место в системе документооборота занимает акт гарантийного обслуживания, в упрощенной, но уже в электронной версии передается автопроизводителю через терминалы [9, 10]. Иными словами, уже к 1996г. в АВТОВАЗ существовал электронный документооборот актов гарантийного обслуживания, который позволял проводить анализ качества продукции в гарантии в полуавтоматическом режиме, с использованием вычислительной техники того времени. Соответственно, для решения задачи классификации дефектов, на предприятии в устойчивом режиме действовал и развивался инструментарий обеспечения кодификации дефектов. В качестве наиболее системного отчетного документа мониторинга автомобилей в гарантийной эксплуатации, того времени, можно назвать «Отчет по анализу дефектов автомобилей производства АО «АВТОВАЗ», эксплуатируемых на территории СНГ». Ежегодный аналитический отчет готовился вплоть до 2010г. группой подразделений: инженерно-технический центр технического обслуживания автомобилей; бюро исследований отказов; бюро статистического анализа дефектов; бюро приемки и предъявления зарекламированных изделий. Структура отчета содержит разделы: общие показатели качества; анализ качества автомобилей по системам; предъявление зарекламированных изделий.

Уровни дефектов, при расчете количественных показателей качества, рассчитывались в относительных единицах (процентах), от среднегодового гарантийного парка (1):

$$\text{Ур деф.} = \frac{\text{Колич.деф.}}{\text{Сред.гар.парк}} \times 100\% \quad (1)$$

В случае, если комплектующие изделия поставляются от двух и более поставщиков, то расчет уровня дефектности ведется по формуле (2):

$$\text{Ур деф.} = \frac{\text{Колич.деф.}}{\text{Колич.пост.издел.}} \times 100\% \quad (2)$$

Сегодня одним из базовых документов, определяющих принципы организации рассматриваемой в работе деятельности является стандарт «Система менеджмента качества. Система сбора и обработки информации по эксплуатации автомобилей в гарантийный период. Основные положения». В основных положениях стандарта сказано, что регистрация, сбор, обработка, хранение и предоставление информации о дефектах и неисправностях, выявленных на автомобилях при проведении предпродажной подготовки и при эксплуатации в гарантийный период, осуществляются с целью: анализа качества автомобилей на основе данных из всех природноклиматических зон; оценка динамики показателей качества автомобилей; прогнозирование показателей качества автомобилей и затрат на гарантийное обслуживание; подготовка заданий проектным; производственным и функциональным подразделениям по устранению причин повторяющихся неисправностей и разработки планов корректирующих действий; возможности возврат из эксплуатации деталей узлов и агрегатов для исследования и установления эффективной обратной связи с подразделениями предприятия.

В стандарте предложены формы акта гарантийного обслуживания и заказ – наряда на устранение неисправностей (рисунок 2).

Рассмотри описание основных полей АГО и заказ-наряда: 0 – номер АГО; 1 – порядковый номер заказ – наряда; 2 – ИНН предприятия; 3 - код предприятия; 4 – наименование предприятия; 5 – стоимость нормо-часа работ по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей; 6 – юридический адрес предприятия сервисно-сбытовой сети; 7 – ФИО владельца автомобиля; 8 – адрес места жительства владельца; 9 – телефон владельца; 10 – электронная почта владельца; 11 – идентификационный номер автомобиля в соответствии с ГОСТ Р 51980; 12 – государственный номер, присвоенный автомобилю в органах ГИБДД при регистрации; 13 – дата продажи автомобиля; 14 – пробег автомобиля, км; 15 – порядковый номер выхода автомобиля с конвейера; 16 – порядковый номер выпущенного двигателя; 17 – дата приемки автомобиля в ремонт; 18 – дата возврата автомобиля из ремонта; 19 – номер по порядку; 20 – номер позиций основной и сопутствующей операций из заказ – наряда; 21 – внешнее проявление дефекта (краткое описание); 22 – трудоемкость н/ч (суммарная трудоемкость выполнение основной и сопутствующей опера-

ций); 23 – стоимость услуг; 24 – стоимость запасных частей; 25 – стоимость материалов; 26 – код типа гарантии из кодификатора типов гарантии; 27 – номер дефектной детали (14-значный код дефектной запчасти из справочника запасных частей; 28 – код дефекта (трехзначный код дефекта из кодификатора дефектов); 29 - место дефекта (трехзначный код определяющий место дефекта); 30 – количество дефектов с данным кодом дефекта; 31 – код поставщика; 32, 38 – порядковый номер дефекта; 33 – обозначение детали (14-значный код запчасти, снятой с автомобиля, из спецификации запасных частей); 34 – количество деталей снятых с автомобиля, шт.; 35 – признак возврата (1 – деталь входит в перечень возвращаемых, 0 – деталь не входит в перечень возвращаемых); 36 – код изготовителя; 37 – дата изготовления; 39 – обозначение детали; 40 – количество установленных деталей в шт.; 41 – цена детали.

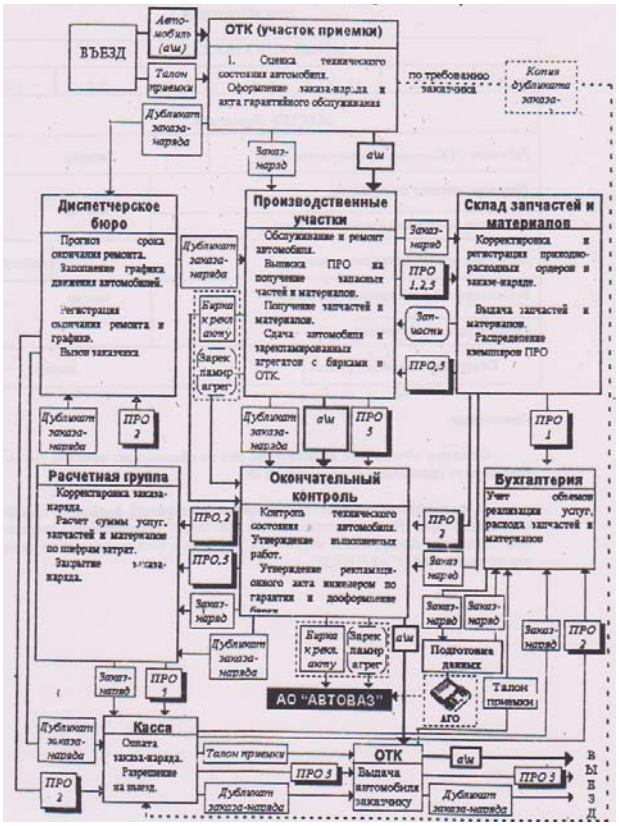


Рис. 1. Схема документооборота при организации работ по техническому обслуживанию и ремонту легковых автомобилей

Из представленных форм документов видно, что широкий набор хорошо детализированной информации позволяет корпоративным службам качества автосборочного производства проводить мероприятия по мониторингу качества продукции в эксплуатации.

Электронные каталоги деталей (рисунок 3), обеспечивают возможность для соответствующего определения запчасти нуждающейся в ремонте или замене.

Наконец, сам электронный кодификатор, в общем, содержит более 4 тысяч кодов дефектов (рисунок 4).

Если провести обобщение, то можно представить алгоритм деятельности по анализу и предъявлению дефектов автомобилей в гарантии (рис. 5).

При организации деятельности по мониторингу качества автомобилей в эксплуатации, в настоящее время широкое распространение получила группа показателей, расчет которой основывается на формуле (3):

$$\mathbf{GMF_B(MIS) = 1000 \times \sum_{i=0}^{i=MIS} k_i} \ , \tag{3}$$

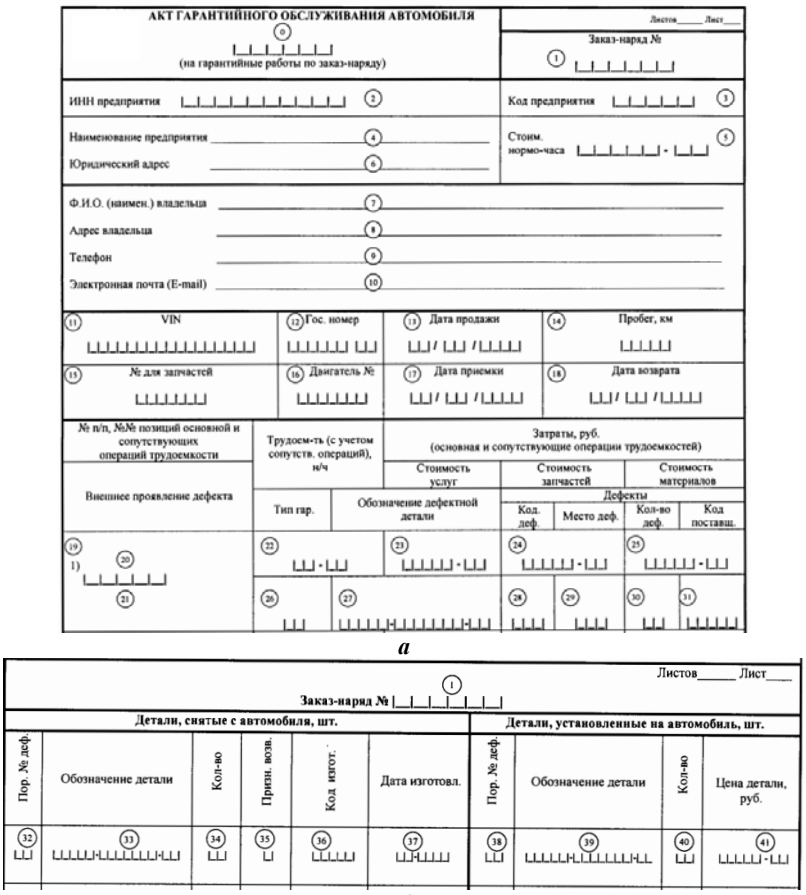
где B – месяц выпуска автомобилей; i – период нахождения автомобиля в гарантии (MIS – Month in Service), рассчитывается как количество месяцев между датой продажи автомобиля и датой открытия заказ-наряда. Он рассчитывается в месяцах и ограничен пределами: 0MIS =[0;1[, 1MIS =[1;2[, …., 36MIS =[36;37[; k_i – показатель рассчитывается как отношение количества дефектов к количеству автомобилей для одного периода нахождения автомобиля в гарантии.

Количество дефектов определяется как количество дефектов, выявленных на i - м месяце гарантии на а/м, изготовленных в месяце и проданных потребителю до месяца (M -2- i). Количество автомобилей – как количество автомобилей, изготовленных в месяце B и проданных потребителю до месяца (M -2- i).

Показатель: K‰ количество дефектов на 1000 автомобилей. Оценка проводится по автомобилям, выпущенным в определенном месяце с учетом продаж и количества месяцев нахождения в гарантии (например: 1, 3, 6, 9, 12, 24, 36 месяцев). M – месяц проведения расчета может быть фактическим месяцем или предыдущим месяцем, если необходимо вычислить уровень предыдущих месяцев.

Как было показано выше, в группу количественных показателей качества оценивающую качество автомобилей в эксплуатации на сегодняшний день входят показатели: дефектности на предпродажной подготовки; де-

фектности по группе месяцев эксплуатации автомобилей; уровню блокирующих дефектов по группе месяцев. В качестве примера результатов мониторинга качества можно привести диаграмму, представленную на рисунке 6. На диаграмме представлены кривые изменения динамики дефектов по коду 3801010000000 - дефект указателя скорости.



а

б

Рис. 2. Стандартизированные формы акта гарантийного обслуживания (а) и заказ – наряда (б) на техническое обслуживание и ремонт автомобилей АВТОВАЗ

а *б*

Рис. 3. Электронный каталог деталей автомобилей

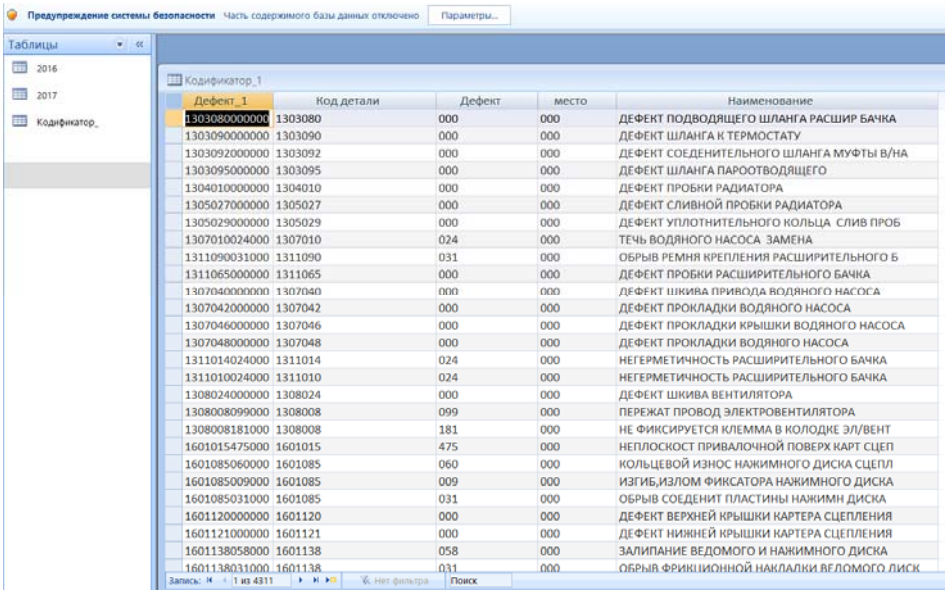
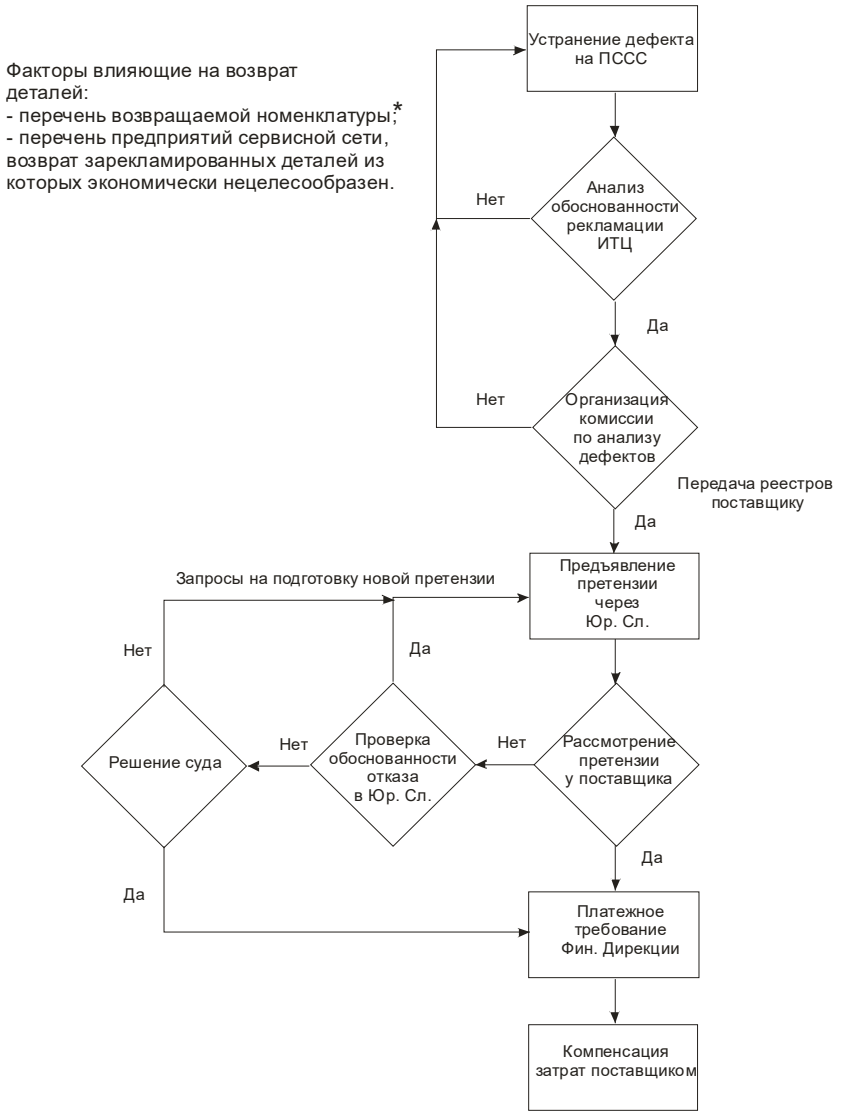


Рис. 4. Электронное окно стандартизированного кодификатора дефектов автопроизводителя



* Перечень корректируется по запросам подразделений.

Рис. 5. Алгоритм работы постоянно действующей комиссии на предприятии автопроизводителя при анализе и предъявлении дефектов автомобилей в гарантии

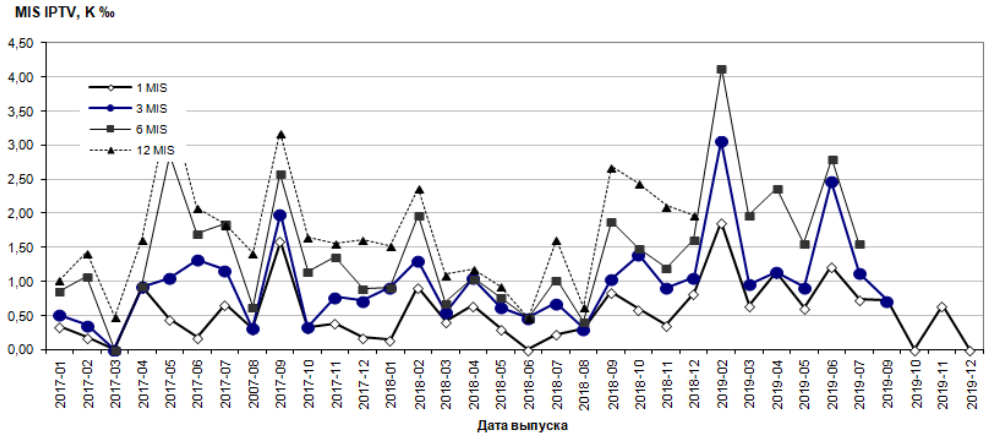


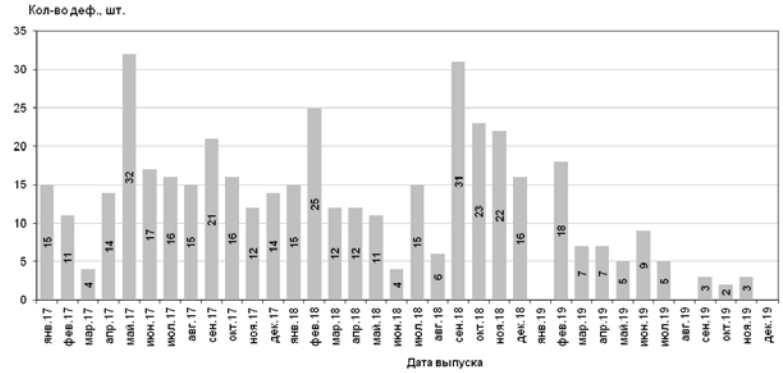
Рис. 6. Диаграмма динамики изменения уровня дефектности по коду 3801010000000 - дефект указателя скорости

По – прежнему, в практике аналитических служб качества, важное значением имеют инструменты позволяющие проводить мониторинг дефектности по количественным показателям представленным в абсолютных числах. На рисунке 7, для того же кода дефекта 3801010000000 - дефект указателя скорости, представлены столбчатые диаграммы изменения показателя количества дефектов по дате выпуска (а) и дате регистрации дефекта на предприятии фирменного автосервиса.

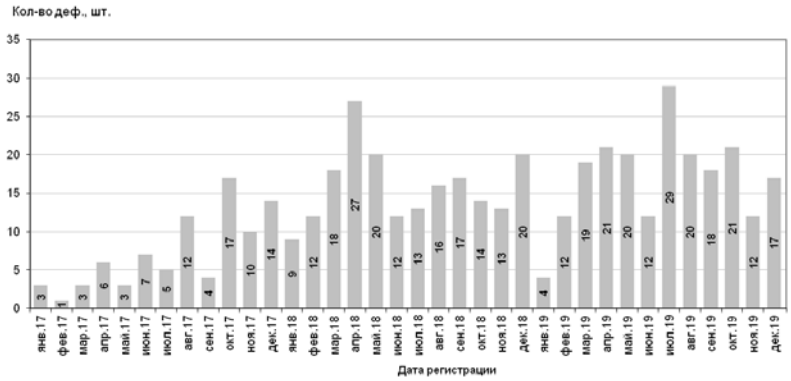
Таблица 1

Показатели мониторинга качества автомобилей в эксплуатации, в абсолютных единицах

Наименование показателя	Расчетная формула	Пояснение
Количество дефектов по дате регистрации	$D^R = \sum_{i=1}^{n} d_i^R$	i – порядковый номер дня анализа $(i = 1, n)$, d_i^R – количество дефектов зарегистрированных за i - й день.
Количество дефектов по дате выпуска	$D^V = \sum_{i=1}^{n} d_i^V$	где d_i^V – количество дефектов зарегистрированных на автомобилях i - го дня выпуска



а



б

Рис. 7. Диаграммы изменения уровня дефектности в абсолютном виде по коду 3801010000000 - дефект указателя скорости, приведенной к дате выпуска автомобиля (а) и дате регистрации дефекта на предприятии фирменного автосервиса (б)

Важное значение при проведении мониторинга качества автомобилей является расслоение показателей дефектности комплектующих по поставщикам. На рисунке 8, в качестве примера приведена диаграмма расслоения дефектов с привязкой к поставщикам изделия, а также представлена таблица поставщиков.

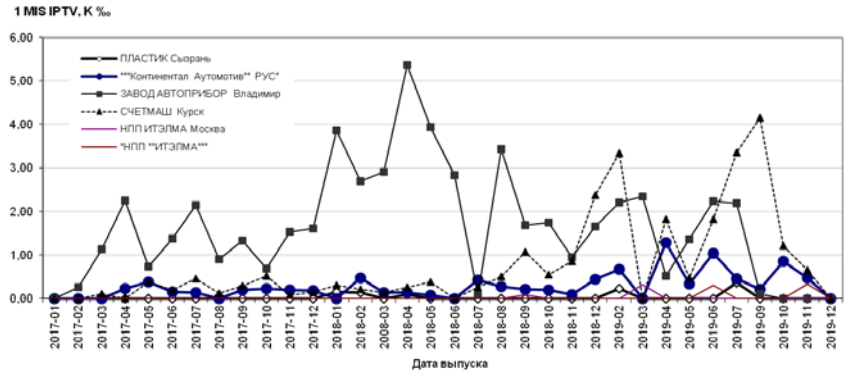
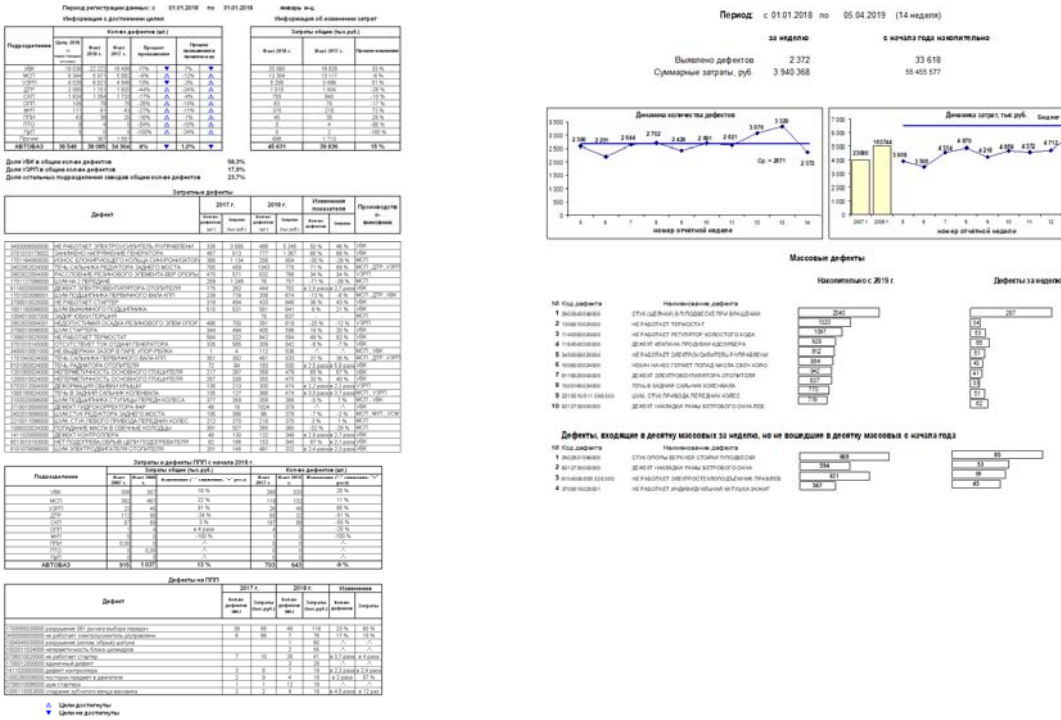


Рис. 8. Инструменты расслоения уровня дефектности автомобилей в эксплуатации по ответственным поставщикам автокомпонентов

Мониторинг затрат на устранение дефектов автомобилей в гарантии является важным инструментом оценки качества продукции (рисунок 9). Для проведения мониторинга используются следующие количественные показатели: суммарные затраты; суммарные затраты по дате регистрации дефектов; суммарные затраты по дате выпуска автомобилей (таблица).

Количественные показатели мониторинга затрат на устранение дефектов новых автомобилей в гарантии

Наименование показателя	Расчетная формула	Пояснение
Суммарные затраты (затраты)	$Z = Z_У + Z_З + Z_М$	$Z_У$ – затраты на услуги, $Z_З$ – затраты на запасные части, $Z_М$ – затраты на материалы
Суммарные затраты по дате регистрации	$Z^R = \sum_{i=1}^{n} z_i^R$	z_i^R – суммарные затраты зарегистрированные за i - й день.
Суммарные затраты по дате выпуска	$Z^V = \sum_{i=1}^{n} z_i^V$	z_i^V – суммарные затраты зарегистрированные на автомобилях i - го дня выпуска



а ***б***

Рис. 9. Примеры справок по результатам мониторинга показателей затрат на обеспечение эксплуатационного качества автомобилей в гарантии

Переходим к практике организации деятельности по кодификации и мониторингу дефектности сложившейся на крупнейшем автомобильном производстве грузовых коммерческих автомобилей.

Базовым документом, определяющим деятельность по кодированию дефектов новых автомобилей в гарантии в ПАО «КАМАЗ» является инструкция И КАМАЗ 02.04-2013 «Правила кодирования дефектов автомобилей КАМАЗ и автобусных шасси».

Порядок кодового обозначения дефекта представлен на рисунке 10.

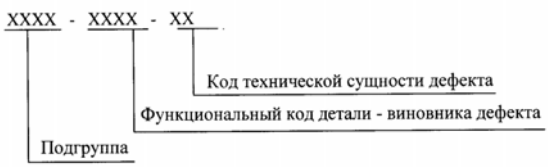


Рис. 10. Порядок кодового обозначения дефекта для продукции КАМАЗ

Описание дефекта состоит из кодового значения описания дефекта и блока общих данных (справочная информация). Структура кодового обозначения (рисунок 10) состоит из: подгруппы четырехзначного номера полгруппы дефектного узла; функционального кода детали – виновника дефекта; кода технической сущности.

Блок общих данных является справочной информацией для использования при кодировании дефектов и включает в себя данные: источник информации (наименование эксплуатирующей организации); регион эксплуатации; дату возникновения дефекта; модель автомобиля; дату выпуска; пробег автомобиля; номер шасси; номер двигателя; модель двигателя; заводской номер и дату изготовления дефектного узла; обозначение дефектного узла; обозначение детали – виновника дефекта; фирма – производитель изделия; пробег отказавшего изделия.

В отличие от правил кодирования дефектов, которые мы рассмотрели выше для продукции АВТОВАЗ, в данном случае, понятия функциональных систем и привязке к ним агрегатов, узлов и пр. не просматривается. Вместо этого используется таблица кодов подгрупп дефектного узла, в качестве примера, часть таблица представлена на рисунке 11 (а). Всего таких кодов (рисунок 11 (а)) более 300.

Коды подгрупп дефектного узла

Код	Наименование
0000	Автомобиль
1000	Двигатель
1001	Подвеска силового агрегата
1002	Блок цилиндров
1003	Головка цилиндра
1004	Поршень шатуном и кольцами
1005	Вал коленчатый и маховик
1006	Вал распределительный
1007	Клапан, толкатель, штанга толкателя
1008	Коллекторы выпускные
1009	Поддон блока цилиндров
1011	Насос масляный
1012	Фильтр очистки масла
1013	Теплообменник масляный
1014	Трубка сапуна с втулкой
1015	Устройство предпусковое подогревательное
1022	Устройство электрофакельное (ЭФУ)
1029	Привод агрегатов
1080	Экран шумоизоляции двигателя нижний
1100	Система питания

а

Функциональные коды деталей - виновника дефекта

Код	Список наименований деталей, узлов и агрегатов
0010	Активатор
0020	Амортизатор
0030	Бак/бачок
0040	Балансир
0050	Балка
0060	Баллон
0070	Бампер
0080	Барабан
0090	Батарея
0100	Башмак
0110	Блок защиты
0120	Блок индикации
0130	Блок комбинированных приборов
0140	Блок контрольных ламп
0150	Блок предохранителей
0160	Блок управления/ контроллер
0170	Блок фар
0180	Блок цилиндров
0190	Блок шестерен
0200	Блок

б

Рис. 11. Часть таблицы кодов подгрупп дефектного узла (а), Часть таблицы функциональных кодов деталей (б)

Функциональные коды деталей, часть которых, в качестве примера приведена в виде таблице на рисунке 11 (б), содержит информацию позволяющую осуществить переход от кода деталей к виновнику дефекта. Здесь, уже соответствующих кодов насчитывается более 360 единиц.

Коды технических сущностей представлены в виде таблицы на рисунке 12.

01	Отсутствует деталь или узел
02	Установлена деталь или узел не соответствующие комплектации
03	Неправильный монтаж детали или узла
04	Вредный контакт
05	Непропаяно, непроварено, непроклеено
06	Литейные раковины, поры
07	Дисбаланс, не отбалансировано
08	Регулировка нарушена или выполнена неправильно
09	Некачественное неподвижное уплотнение, завальцовка или обжим
10	Некачественная механическая обработка поверхности
20	Заклинивание (зависание, залегание, схватывание) движущихся деталей
21	Задир, подклинивание, царапины движущихся деталей
22	Трещина или разрыв материала
23	Засорение, наличие инородного материала
24	Коррозия (ржавчина), нарушение лакокрасочного покрытия или его отсутствие
25	Прогар элементов системы выпуска
26	Расслоение материала
27	Чрезмерный (преждевременный) износ, не допустимый люфт в подвижных соединениях
28	Деформация, разбухание (изменение формы без разрушения), потеря упругости
30	Срыв (деформация) резьбы
31	Скол, срез, выкрашивание материала
32	Разрушение
33	Механически неисправный узел (без разборки)
34	Смещение (самопроизвольное) в процессе эксплуатации
50	Обрыв или перегорание электрической цепи
51	Короткое замыкание электрической цепи
52	Плохой (не стабильный) контакт в электрической цепи
53	Окисление, коррозия, подгорание контактов электрической цепи
54	Нарушение изоляции электроприборов, электропроводки
55	Электрический или электронный прибор (блок) функционирует не правильно
56	Электрический или электронный прибор (блок) не функционирует

Рис. 12. Коды технических сущностей дефекта

В качестве основных индикаторов используемых при мониторинге уровня дефектности на предприятии используют группу показателей включающую: количество гарантийных автомобилей; уровень рекламаций в % к гарантийному парку за месяц; уровня рекламаций за квартал или год.

Под гарантийным парком автомобилей условно понимается количество гарантийных автомобилей, которое должно находиться на гарантии на конец отчетного месяца по гарантийному сроку (направление народное хозяйство - 12 месяцев со дня ввода автомобиля в эксплуатацию) и рассчитывается по формуле:

$$А_Г = \sum_1^n А_{Гi}, \quad (3)$$

где $А_{Гi}$ - количество а/м, стоящих на гарантийном учете за i-ый месяц; за 1-ый месяц (i=1) принимается отчетный месяц; за 2-ой месяц (i =2) принимается месяц предыдущий отчетному месяцу; (1 месяц) и т.д. до n-ого месяца (i = n).

Уровень рекламаций в % к гарантийному парку за месяц ($У_{рм}$) рассчитывается по формуле:

$$У_{рм} = \frac{Р_м}{А_Г} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $Р_м$ - количество принятых рекламаций за отчетный месяц; $А_Г$ - гарантийный парк автомобилей, рассчитывается по информации с сервисных центров ежемесячно.

Кроме представленных выше количественных индексов, следует указать то, что в последнее десятилетие предприятия развивает группу показателей, аналогичную применяемой в международной практике и на Волжском автомобильном заводе. Отличием в структуре расчета показателей уровня дефектности в ПАО «КАМАЗ» от используемых в ОАО «АВТОВАЗ», заключается в приведении к относительной величине через учет 100 единиц продукции (у АВТОВАЗа перевод осуществляется к 1000 автомобилей).

В первую очередь следует выделить ключевой принцип, который коренным образом отличает аспекты формирования кодификатора дефектов отечественных и иностранных автосборочных предприятий. Дело в том, что в отечественной автомобильной отрасли при организации кодификатора отталкиваются от инженерии. В нашей практике, первично опрашивается потребитель относительно причин посещения специализированного автоцентра. Инженер по гарантии в свободной форме записывает жалобы потребителя. Во время ремонта происходит уточнение потребительских претензий и в момент закрытия заказ – наряда, формируется необходимая совокупность кодов, которая однозначно определяет дефект. Инженер по гарантии имеет право в заказ – наряде в свободной форме, но компетентно изложить суть проблемы связанной с дефектом. Особенно это важно при проявлении так называемых уникальных или новых дефектов. Но все же в отечественной практике очень важную роль имеет процесс кодирования информации посредством использования стандартизированного кодификатора. И в рассмотренном опыте АВТОВАЗ и КАМАЗ четко выделено это базовое начало, когда каждый дефект имеет хорошо детализированную систему многоуровневого кодирования, охватывающую код системы, узла, детали, места дефекта, поставщика и т.д.

Список литературы

1. Козловский, В.Н. Модели аналитических исследований качества и надежности легковых автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, С.И. Клейменов // Автомобильная промышленность. 2013. № 9. С. 1-5.

2. Заятров, А.В. Комплексная оценка качества и надёжности электрооборудования легкового автомобиля: дис. … канд. техн. наук: 05.09.03 / А.В. Заятров. Тольятти, 2013. 186 с.

3. Разработка и внедрение системы оценки качества и конкурентоспособности автомобилей: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.02.23 / Е.В. Полякова. Тольятти, 2016. 16 с.

4. Строганов В.И. Повышение эксплуатационных характеристик электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой: автореф. дис. … докт. техн. наук: 05.09.03 / В.И. Строганов. Самара, 2014. 43 с.

5. Шанин С.А. Совершенствование методик и инструментария системы мониторинга качества автомобилей в эксплуатации: диссертация кандидата технических наук: 05.02.23 / С.А. Шанин. Самара, 2019.

6. Айдаров Д.В. Развитие теории и практики управления конкурентоспособностью в автомобилестроении на основе методологии потребительской ценности качества: дис. д-ра техн. наук: 05.02.23 / Д.В. Айдаров. Самара, 2020.

7. Благовещенский Д.И. Разработка методологии и инструментария комплексной программы улучшений для повышения конкурентоспособности машиностроительных (автосборочных) предприятий: дис. д-ра техн. наук: 05.02.23 / Д.И. Благовещенский. Самара, 2021.

8. Козловский В.Н. Потребительская ценность качества автомобилей / В.Н. Козловский, Г.Л. Юнак, Д.В. Айдаров, С.А. Шанин // Стандарты и качество. 2017. № 12. С. 76-80.

9. 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.

10. 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.

Антонова Наталья Алексеевна, аспирант, vera1967.antonova@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,

Клентак Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, anna_klentak@mail.ru, Россия, Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,

Козловский Николай Владимирович, учащийся, nikkozlovskiy13@mail.ru, Россия, Самара, ГАОУ СО «СамЛИТ (Базовая школа РАН)»

DOMESTIC EXPERIENCE IN ORGANIZING AND PROVIDING CODIFICATION AND MONITORING OF VEHICLE DEFECTS IN OPERATION

N.A. Antonova, V.N. Kozlovsky, A.S. Klentak, N.V. Kozlovsky

The article presents the results of a study of domestic experience in automotive production in the field of organizing and ensuring codification and monitoring of vehicle defects in operation.

Key words: competitiveness, quality, automotive production, codification of problems, operation.

Antonova Natalya Alekseevna, postgraduate, vera1967.antonova@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,

Klentak Anna Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, anna_klentak@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University),

Kozlovsky Nikolay Vladimirovich, student, nikkozlovskiy13@mail.ru, Russia, Samara, SAOU SO «SamLIT (Basic School of the Russian Academy of Sciences)»

УДК 629.113
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-473-474

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ УЗНАВАЕМОСТИ И ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО КАЧЕСТВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ И МАРОК ЭЛЕКТРОИНСТРУМЕНТОВ

М.М. Васильев, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров

В статье представлены результаты исследования факторов узнаваемости и потребительского качества электроинструментов различных марок.

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, электроинструмент.

В представленной статье предложены результаты исследования потребительского рынка электроинструментов по основным факторам определяющим качество продукции [1 – 3].

Анализ уровня известности электроинструментов отдельных марок среди опрошенных респондентов [4 – 6], выполненный по результатам ответов на вопрос: «Какие марки электроинструментов Вам знакомы?» свидетельствует о том, что в целом электроинструменты марки первой из отечественных марок «Интерскол», занимают 4-е место с показателем в 59,6% известности среди принявших участие в данном опросе респондентов (рисунок 1). Опережают по данному показателю электроинструменты следующих марок: Makita – известна 81,2% опрошенным респондентам, Bosch - 80,6% опрошенных респондентов, а Hitachi - 66,6% опрошенных респондентов.

Продукция марки «Makita» наиболее известна среди «любителей», пользующихся электроинструментом время от времени (78,3% ответов респондентов относящихся к данной категории). На втором месте также как и в целом по общей выборке исследования оказался Bosch «синий» (75,8% ответов респондентов относящихся к данной категории). Продукция отечественной марки «Интерскол» наименее известна среди пользователей относящихся именно к данной категории – всего 51,9% ответивших респондентов.

В это же время среди «профессионалов» лидирует бренд Bosch «синий» (86,1% ответов респондентов относящихся к данной категории), а на втором месте бренд «Makita» (81,2% ответов респондентов относящихся к данной категории). Продукция марки «Интерскол» узнаваема среди участников опроса данной категории в 64,4% случаев (также 4-е место).

Наиболее узнаваемой продукция марки «Интерскол» оказалась среди «не профессиональных пользователей, рассматривающих свою работу с электроинструментами в качестве хобби» - 68,1% опрошенных респондентов данной категории. Лидируют в данной категории владельцы «Makita» и Bosch «синий» по 85,1% респондентов (рисунок 1).

Относительно опыта использования опрошенными пользователями различных видов электроинструментов следует отметить, что наиболее популярными оказались дрели сетевые – среди 82,5% респондентов, а также аккумуляторные дрели – среди 70,5% респондентов и перфораторы – среди 74,6% респондентов. Несколько менее популярными оказались эл. лобзики – среди 64,8% респондентов. Результаты ответов на вопрос: «Укажите, опыт использования, каких видов электроинструмента или оборудования у Вас имеется (владеете или пользуетесь на работе)?» представлены в таблице и на диаграмме (рисунок 2).

Из 14 рассмотренных групп электроинструментов в восьми «профессионалы» лидирует по уровню владения данными видами, в том числе по: «Дрелям аккумуляторным», «Перфораторам», «Дисковым пилам», «Торцовочных пил», «Шлиф. Машинкам», «Сварочным инверторам», «Бензогенераторам», «Компрессорам».

Инструментами из оставшихся шести групп в большей степени владеют «не профессиональные пользователи, рассматривающие свою работу с электроинструментами в качестве хобби»: «Дрель сетевая (ударная / безударная)», «УШМ», «Эл. Лобзик», «Эл. Рубанок», «Снегоуборщик», «Садовая техника».

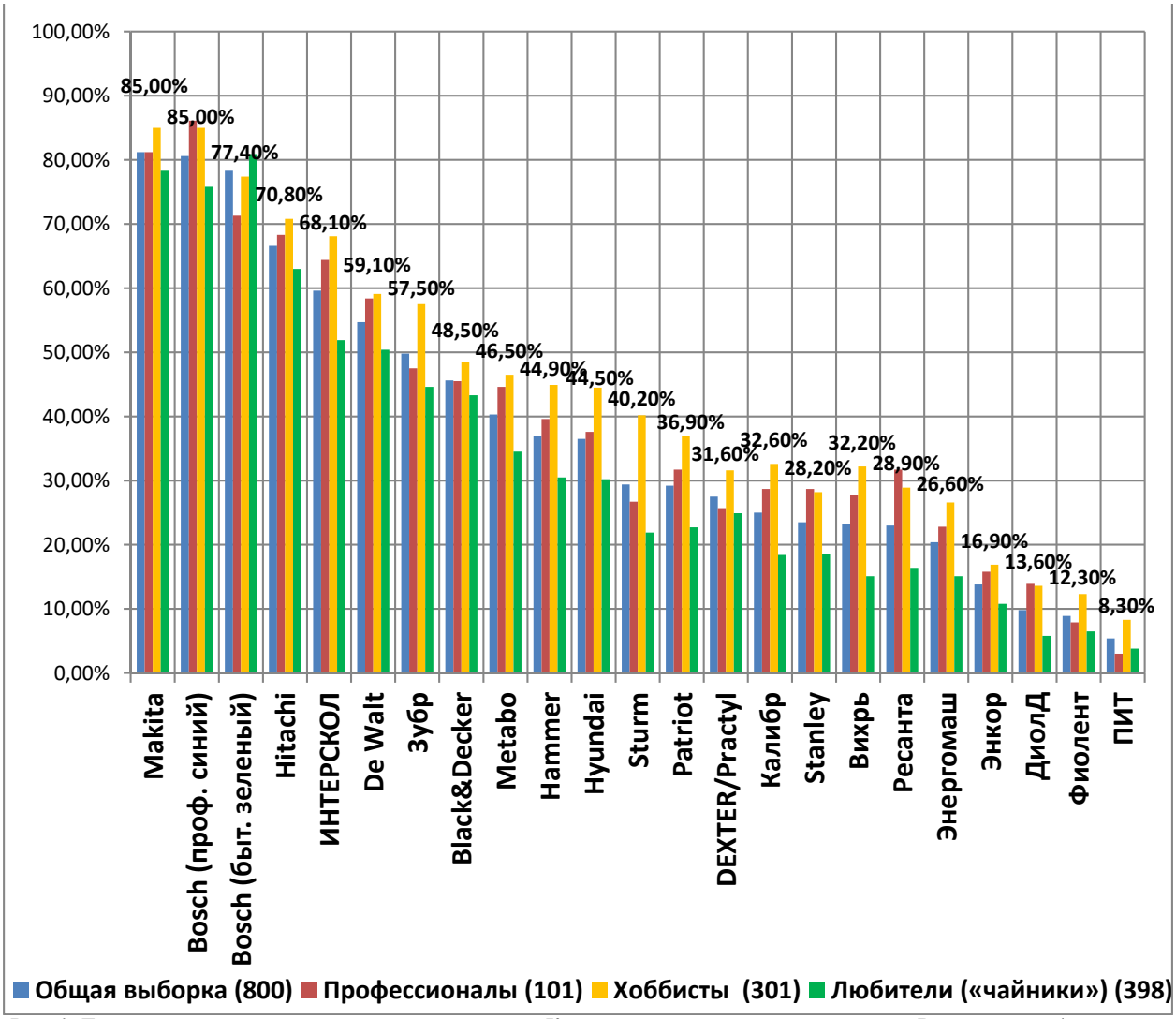


Рис. 1. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «Какие марки электроинструментов Вам знакомы (можно выбрать не более пяти вариантов)?» (в разрезе «профессионал» - «хоббисты» - «любитель»)

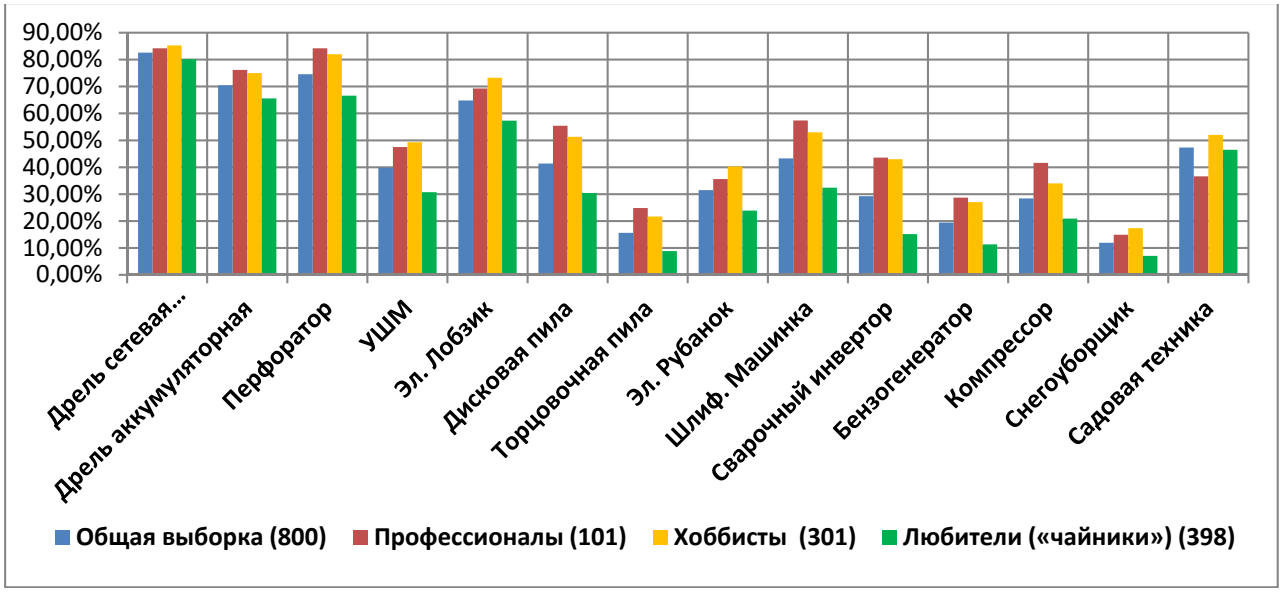


Рис. 2. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «Какими видами электроинструментов Вы владеете, или пользуетесь на работе (можно выбрать не более пяти вариантов)?» (в разрезе «профессионал» - «хоббисты» - «любитель»)

Важным фактом по результатам исследования стало то, что с 2015 по 2020 годы уровень информированности потребителей об электроинструментах вырос в 1,656 раз, о чем свидетельствуют результаты сравнительного анализа, базирующихся на данных приведенных в таблице.

Результаты ответов потребителей на вопрос «Какие виды электроинструментов Вам знакомы»?

Инструмент	Общая выборка 2020 год			Общая выборка 2015 год		
	Ответы		Процент наблюдений	Ответы		Процент наблюдений
	N	Проценты		N	Проценты	
Дрель сетевая (ударная / безударная)	660	13,8%	82,6%	1160	20,7%	75,1%
Дрель аккумуляторная	563	11,7%	70,5%	758	13,5%	49,1%
Перфоратор	596	12,4%	74,6%	722	12,9%	46,7%
УШМ	318	6,6%	39,8%	447	8,0%	28,9%
Эл. Лобзик	518	10,8%	64,8%	633	11,3%	41,0%
Дисковая пила	331	6,9%	41,4%	457	8,2%	29,6%
Торцовочная пила	125	2,6%	15,6%	99	1,8%	6,4%
Эл. Рубанок	252	5,3%	31,5%	242	4,3%	15,7%
Шлиф. Машинка	346	7,2%	43,3%	229	4,1%	14,8%
Сварочный инвертор	233	4,9%	29,2%	280	5,0%	18,1%
Бензогенератор	155	3,2%	19,4%	168	3,0%	10,9%
Компрессор	227	4,7%	28,4%	137	2,4%	8,9%
Снегоуборщик	95	2,0%	11,9%	48	0,9%	3,1%
Садовая техника	378	7,9%	47,3%	186	3,3%	12,0%
Всего	4797	100,0%	600,4%	5600	100,0%	362,5%

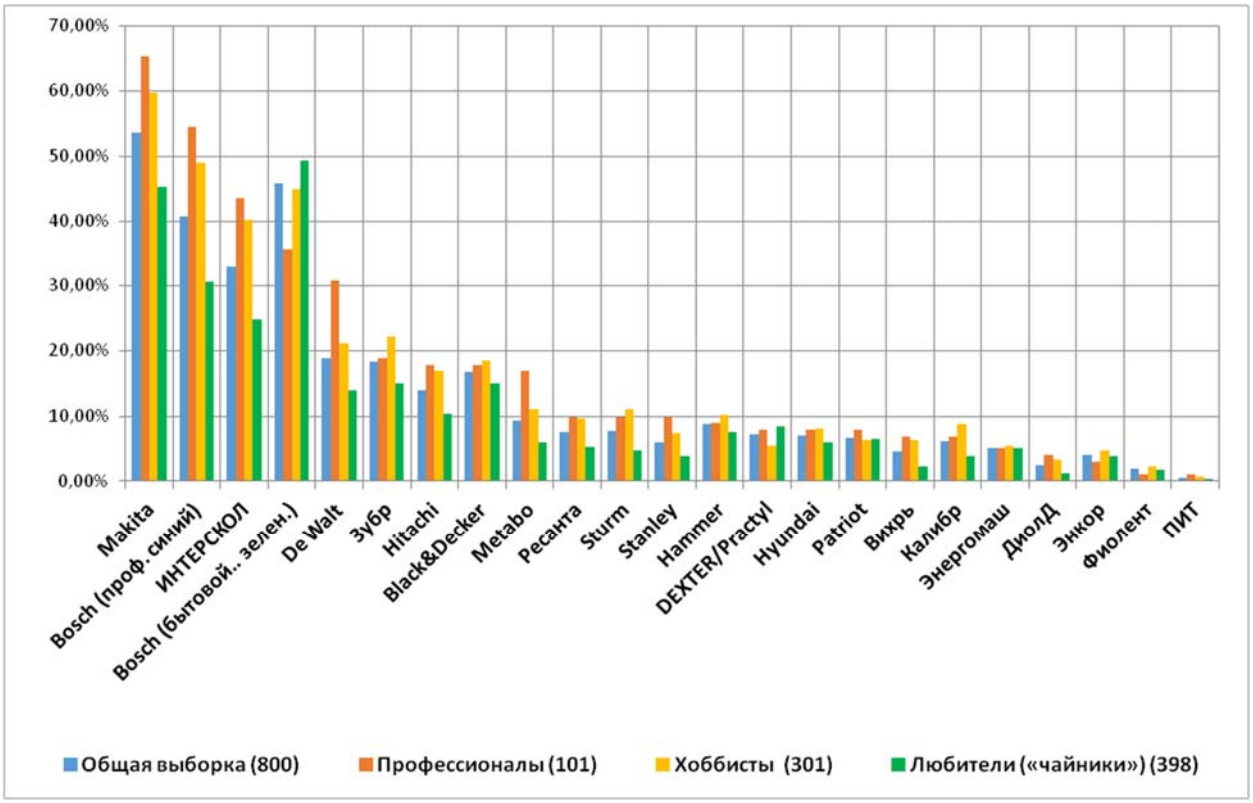


Рис. 2. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «Электроинструментами, каких марок Вы владеете, или пользуетесь на работе?» (в разрезе «профессионал» - «хоббисты» - «любитель»)

Анализ опыта использования электроинструментов различных марок среди опрошенных респондентов, выполненный по результатам ответов на вопрос: «Укажите, электроинструмент, каких марок у Вас есть (владеете или пользуетесь)?» (рисунок 2) свидетельствует о том, что в целом электроинструменты отечественного лидера отрасли занимают 3-ю позицию с показателем в 33,1% среди принявших участие в данном опросе респондентов. Опережают по данному показателю отечественную марку электроинструменты марки: Makita – используются 53,5% опрошенными респондентами и Bosch - используется 45,9% опрошенными респондентами.

Однако следует обратить внимание на тот факт, что по отдельным группам потребителей уровень владения электроинструментами различных марок существенно отличается. Так уровень владения электроинструментами марок: «Makita», «Bosch синий проф.», «Интерскол», «De Walt», «Hitachi», «Metabo», «Ресанта» среди профессиональных пользователей значительно выше, чем среди других категорий пользователей. Уровень владения электроинструментами таких марок как «Bosch (бытовой зелен.)» и «DEXTER/Practyl» наиболее высокий среди «любителей», пользующихся электроинструментом время от времени. Уровень владения электроинструментами таких марок как «Зубр» и «Hammer», «Black&Decker», «Калибр», «Sturm» наиболее высокий среди «не профессиональных пользователей, рассматривающих свою работу с электроинструментами в качестве хобби».

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Petrovski S.V. Intelligent diagnostic complex of electromagnetic compatibility for automobile ignition systems / V.N. Kozlovski, A.V. Petrovski, D.F. Skripnuk, V.E. Schepinin, E. Telitsyna // Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions). 6th International Conference ICRITO. 2017. С. 282-288.
4. Козловский В.Н. Перспективные системы диагностики управления автономным транспортным объектом / В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, О.И. Деев, А.Ф. Колбасов, С.В. Петровский, А.П. Новикова // Грузовик. 2017. № 6. С. 21-28.
5. Козловский В.Н. Развитие проектов электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой / В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, М.М. Васильев, В.В. Дебелов // Грузовик. 2018. № 6. С. 18-21.
6. Козловский В.Н. Моделирование энергоемких накопителей автомобильной комбинированной энергоустановки / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, С.В. Петровский // Грузовик. 2018. № 11. С. 13-14.

Васильев Максим Михайлович, аспирант, vasmarket@mail.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,

Айдаров Дмитрий Васильевич, д-р техн. наук, профессор, adv_tol@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

ASSESSMENT OF FACTORS OF RECOGNITION AND CONSUMER QUALITY WHEN USING VARIOUS TYPES AND BRANDS OF POWER TOOLS

M.M. Vasiliev, V.N. Kozlovsky, D.V. Aidarov

The article presents the results of a study of factors of recognition and consumer quality of power tools of various brands.

Key words: competitiveness, quality, power tools.

Vasiliev Maxim Mikhailovich, postgraduate, vasmarket@mail.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,

Aidarov Dmitry Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, adv_tol@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 67.05
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-476-477

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХРАНОЙ ТРУДА НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ В УСЛОВИЯХ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.В. Новиков, А.Е. Литвинов, А.Н. Чукарин, С.Ю.Ксандопуло

В данной статье представлены результаты исследования, необходимого для комплексной оценки состояния охраны труда и подготовки рекомендаций по поддержанию ее на заданных параметрах на машиностроительных предприятиях, оснащенных металлорежущими станками и вспомогательным оборудованием для их эксплуатации. Обосновывается необходимость создания системы управления охраной труда. Система позволяет провести качественную оценку состояния охраны труда на машиностроительных предприятиях и порядка применения системы аудита СУОТ, что может быть использовано для выявления слабых мест в системе управления охраной труда и, исходя из полученных результатов, принятия управленческих решений по поддержанию ее на заданных параметрах.

Ключевые слова: охрана труда, система управления, управленческие решения, ленточнопильный станок.

Для металлообрабатывающей промышленности в настоящее время характерно использование устаревшего оборудования и технологий, что зачастую приводит к неудовлетворительной ситуации в области охраны труда. Участки и цеха металлорежущих станков практически всегда относятся к опасным зонам из-за повышенного уровня шума на рабочих местах, создаваемого этим оборудованием.

Из всех металлорежущих станков особое внимание следует уделить станкам пильной группы. Для станков пильной группы характерны высокие уровни шума в высокочастотном диапазоне (что обусловлено конструкцией узла резания, высокими скоростями и геометрией режущего инструмента), превышающие предельно допустимые значения на 15-25 дБ, и повышенная концентрация мелкодисперсной металлической пыли, которая может вызывать такие профессиональные заболевания, как шумовая болезнь, пневмокониоз, силикоз. Следует отметить, что системы защиты работников от шума и пыли не предусматриваются при проектировании бытовых станков пильной группы и крайне редко применяются в процессе эксплуатации.

В связи с этим важным вопросом является правильный выбор технологии и комплекса организационных и инженерных систем защиты от шума, вибрации и других вредных факторов на стадии проектирования отрезных станков. При эксплуатации описанных выше технических средств необходимо также решать вопросы, связанные с экспертной оценкой качества работы и совершенствованием систем защиты от шума. В таких случаях необходимо управлять, чтобы обеспечить максимальную эффективность организации рабочего процесса пиления.

На рис.1 представлен состав опасных и вредных факторов при работе на отрезных станках.

Рис. 1. Состав опасных и вредных факторов при работе на станках пильной группы

Микроклимат включает в себя такие факторы, как влажность (повышенная или пониженная), температурный режим (значительно выше летом и значительно ниже зимой по сравнению с нормами, установленными СанПиН) и движение воздуха (например, сквозняки).

Вибрация:

-Общая, включая вибрацию от цехового оборудования, движения кран-балки, работы промышленных кондиционеров, а также вибрацию, возникающую при работе и движении машин и механизмов, связанных с технологическим процессом;

-Местные вибрации, возникающие при работе станков на холостом ходу;

-локальные вибрации, возникающие при работе станков на холостом ходу.

Освещенность: включает естественную освещенность рабочего места, искусственную освещенность, характеризующуюся типом и количеством ламп в цехе и их сочетанием. Запыленность: рассеивание пыли и ее концентрация. Электробезопасность: например, наличие или отсутствие дефектов заземления, зануления и электроизоляции, наличие или отсутствие автоматических защитных устройств. Наличие в окружающей среде опасных веществ, таких как СОЖ, смазочные материалы, чистящие средства, агрессивные жидкости и т.п. на рабочей площадке или в соответствии с требованиями технического процесса резки.

Классифицируемый шум.

-Общий рабочий шум-шум, создаваемый оборудованием, работающим на рабочем месте;

-локальный шум - шум, возникающий в рабочей зоне станка во время его работы на холостом ходу;

-Шум при выполнении операций резки.

Все факторы могут быть снижены путем применения технических или организационно-технологических мероприятий.

Наиболее опасным и конструктивно неизвестным фактором является шум, возникающий в процессе порезки. Воздействие этого шума на работников можно снизить организационными мерами и применением средств индивидуальной защиты (берушей), однако использование берушей может привести к росту травматизма, так как они снижают восприятие работниками окружающей действительности. Поэтому существует острая необходимость в конструктивных (инженерных) мероприятиях, направленных на снижение этого фактора.

Для комплексной оценки состояния охраны труда и выработки рекомендаций по поддержанию заданных параметров необходимо разработать структуру системы управления охраной труда на машиностроительных предприятиях, оснащенных металлорежущими станками и вспомогательным оборудованием для их функционирования. Исходя из существующей нормативной базы по охране труда, она должна иметь следующий вид (рис.2).

Наиболее интересными частями схемы являются операционный блок основного оборудования, блок аудита и сопутствующий ему блок оценки и формулирования контрольных мероприятий. Структурная схема операционных блоков может быть представлена в следующем виде (рис.3). На этой схеме показано, какие опасности контролируются и какие элементы участвуют в оценке состояния охраны труда на этапе эксплуатации как основного, так и дополнительного оборудования.

После детального анализа отечественных и международных систем оценки состояния охраны труда на предприятиях трудно не заметить, что способы обеспечения охраны труда в нашей стране заметно отличаются от таковых в других промышленно развитых странах. Зарубежные предприятия уже много лет используют для этих целей программируемые автоматизированные системы управления, и их опыт насчитывает уже не одно поколение. В России основным критерием оценки достаточного уровня охраны труда является уровень травматизма и профессиональной заболеваемости. Для создания наиболее эффективной системы такой оценки необходимо учесть все критерии, используя опыт существующих отечественных и международных методик. В настоящее время в нашей стране путь к обеспечению программируемыми системами безопасности предприятий и производств только начался, но они

уже активно внедряются на крупных объектах, таких как атомные станции и гидроэлектростанции. И хотя это единичные случаи и качество этих систем зачастую еще не на должном уровне, этот факт ни в коем случае нельзя упускать из виду при построении систем оценки состояния охраны труда на предприятиях.

Применяемые в нашей стране методы, такие как вероятностный, детерминированный, монокулярный или с использованием коэффициентов тяжести, основаны на взаимозависимости несчастных случаев, состояния охраны труда и выявления совокупности условий, приведших к травме работника. Иными словами, все они, как правило, основаны на практике и применяются уже после того, как произошел нежелательный исход. Если на предприятии не было зафиксировано ни одного случая травматизма или профзаболевания, то эти методы оценки не могут быть применены.

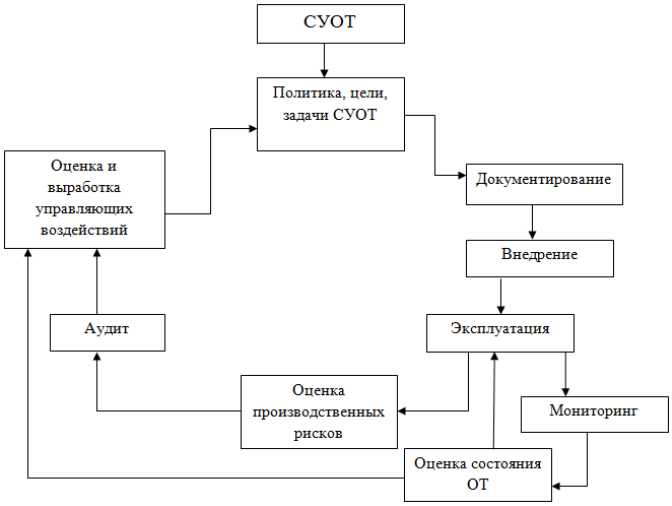


Рис. 2. Система управления охраной труда на предприятиях машиностроения.

Рис. 3. Система управления охраной труда при эксплуатации основного оборудования

По опыту зарубежных специалистов, в своих странах они уже давно отошли от подобных методик: методы оценки состояния охраны труда на предприятиях по МЭК61508 представляют собой комплекс различных программируемых и автоматизированных систем управления безопасностью на предприятиях. Эти методы позволяют выявить недостатки в таких системах еще до того, как произойдет несчастный случай или травма работника. Однако все эти методы для отечественного производства слишком сложны и не подходят для оценки небольшого количества программируемых систем, используемых лишь на нескольких предприятиях. Прежде чем внедрять эти методы в системы оценки охраны труда на предприятиях, их необходимо упростить и адаптировать к условиям нашей страны. Для разработки системы оценки состояния охраны труда на предприятиях необходимо выбрать критерии и показатели для проведения этой оценки, а также их значения, удовлетворяющие положительным результатам. Критерии представлены на рис.4. Пусть общая оценка состояния охраны труда на предприятии представлена буквой А латинского алфавита. Выбранные показатели (организация труда, состояние машин и оборудования, технические процессы) обозначим буквами B, C и D соответственно. Итоговая общая оценка будет строиться по такой формуле:

$$A = \sqrt[3]{B \cdot C \cdot D} \quad (1)$$

Но два из трех индикаторов делятся на ряд подиндикаторов. Так, индикатор B (организация работ) состоит из семи подиндикаторов – это - производственный процесс, проведение обучения и инструктажи по охране труда, порядок и чистоту на рабочем месте, факторы окружающей среды, эргономику, проходы и проезды, возможности для спасения и оказания первой помощи.

Рис. 4. Выбор критериев для системы оценки состояния охраны труда на предприятии.

Обозначим их b1, b2, b3, b4, b5, b6 и b7. Тогда индикатор B будет вычисляться следующим образом:

$$B = \sqrt[7]{b_1 \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot b_4 \cdot b_5 \cdot b_6 \cdot b_7} \quad (2)$$

Индикатор C (машины и оборудование) включает в себя четыре подиндикатора – это состояние и конструкция оборудования, наличие и состояние устройств управления и аварийного выключения, наличие и состояние устройств защиты, а также подъемы и площадки для обслуживания, следовательно, обозначив их c1, c2, c3, и c4, получим:

$$C = \sqrt[4]{c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4} \quad (3)$$

Но каждый из подиндикаторов b1, b2, b3, b4, b5, b6 и b7 также состоит из ряда факторов (x1, x2, ..., x28), поэтому рассчитываться они будут аналогично формулам (1), (2) и (3). Следовательно, схематично оценка состояния охраны труда будет выглядеть, как показано на рис 5.

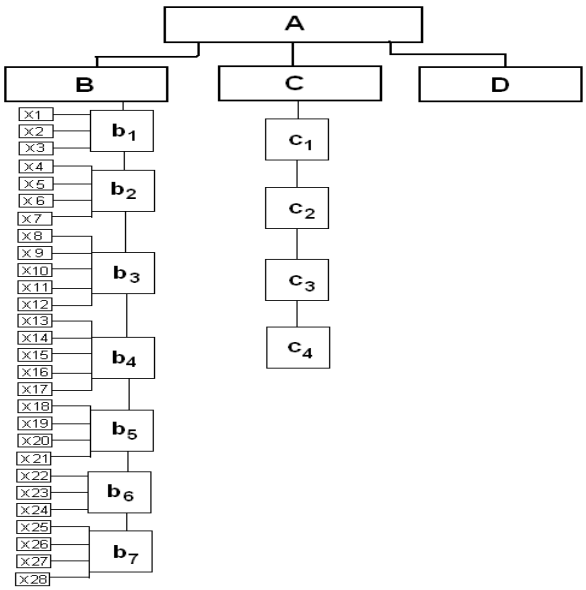


Рис. 5. Схематичное изображение расчета оценки состояния труда

Выводя оценку по каждому из индикаторов, можно определить не только общую оценку состояния охраны труда на предприятии, но и выявить, какие из факторов производства ощутимо влияют на ее снижение и нуждаются в совершенствовании. Таким образом, повышая показатели отдельных элементов, можно повысить общий уровень состояния охраны труда на предприятии, а, следовательно, уменьшить вероятность возникновения аварий и несчастных случаев на производстве.

Как видно из рис. 4 для получения комплексной оценки состояния ОТ на предприятии необходимы данные по аудиту СУОТ. Одним из основных требований к СУОТ для определения ее эффективности является процедура аудита СУОТ. Данная процедура является обязательной.

Анализ документов по СУОТ показал, что механизм проведения аудита СУОТ не достаточно разработан и определен. Основным руководящим документом по вопросам аудита СУОТ является ГОСТ Р 12.0.008-2009, однако данный документ регламентирует лишь общие подходы к организации и проведению аудита СУОТ.

Первоочередное назначение аудита – контролировать выполнение функций (элементов) СУОТ и соблюдение соответствующих нормативных документов (требований), а также степень соответствия критериям аудита. При этом критерии ни аудита, ни СУОТ четко не прописаны. В ГОСТ Р 12.0.008-2009 дается определение критерия аудита как совокупности политики, процедур и требований. Однако ни требования, ни процедуры не прописаны. Данный вопрос отдается на рассмотрение самой организации либо организации, привлекаемой к проведению аудита. Вместе с тем, определение четких критериев аудита является определяющим. Иначе, зачем затевать данную процедуру? Аналогично обстоит положение дел и с процедурами. Понятие процедуры и, что относить к процедуре СУОТ не определено.

Нами предлагается в качестве критериев аудита использовать:

- наличие политики в области ОТ и ее соответствие поставленным целям;
- выполнение нормативных требований по ОТ в организации (структурных подразделениях, на рабочих местах);
- наличие и качество разработки документов СУОТ;
- наличие и качество разработки процедур СУОТ и их использование (применение);
- оценка эффективности СУОТ (по результатам оценок показателей травматизма и других оценок состояния ОТ).

Критерий выполнение нормативных требований по ОТ предполагает выборочную оценку определенного набора нормативных требований в структурных подразделениях (на рабочих местах). Для этих целей рекомендуется разработать карту аудита, внешний вид которой представлен на табл. 1. В карте указываются основные проверяемые вопросы, требования нормативных документов и фактическое состояние дел. Отдельной графой выделяются несоответствия. Карта заполняется аудитором.

Критерий наличие и качество разработки документов СУОТ связан с анализом и оценкой документов, к числу которых относятся:

- политика (концепция) в области ОТ;
- положение по СУОТ;
- стандарты (руководства) предприятия по вопросам ОТ
- приказы, журналы и акты по вопросам ОТ.

Критерий наличия и качества разработки процедур СУОТ связан с рассмотрением и анализом ее функционирования. При этом в качестве обязательных процедур предлагается использовать следующие:

- Сбор и передача информации по ОТ;
- Оценка состояния ОТ и эффективности функционирования СУОТ;
- Предупреждающие и корректирующие действия;
- Аудит СУОТ.

Наибольший интерес с точки зрения функционирования СУОТ представляет критерий оценки эффективности СУОТ. Данный критерий необходимо определять по результатам оценок состояния ОТ (показателей травматизма, исполнительности, безопасности оборудования и др.). Вопрос оценки данного критерии выходит за рамки рассмотрения и связан с разработкой системы интегральных показателей состояния ОТ. При разработке и внедрении системы аудита СУОТ необходимо учитывать требования следующих нормативных документов:

ГОСТ 12.0.230-2007 Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Общие требования

ГОСТ Р. 12.0.007-2009. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Общие требования по разработке, применению, оценке и совершенствованию.

ГОСТ Р 12.0.008-2009 - Система стандартов безопасности труда. Система управления охраной труда в организациях. Проверка (аудит).

ГОСТ Р. 12.0.009-2009. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда на малых предприятиях. Требования и рекомендации по применению.

«Руководство по системам управления охраной труда МОТ-СУОТ 2001 (ILO-OSH 2001)».

OHSAS 18001:2007 «Системы менеджмента охраны здоровья и обеспечения безопасности труда. Требования».

Форма карты аудита нормативных требований охраны труда

№ п/п	Проверяемый вопрос	Требование нормативного документа	Фактическое состояние (да/нет)	% выполнения Замечания	Наличие несоответствия
1	Проведение периодических медицинских осмотров (по перечню профессий для мед. осмотров)	В соответствии с перечнем	Да	100%	
2	Проведение инструктажей по ОТ (по журналу регистрации инструктажей на РМ)	Первичный Периодический Внеплановый	Да Нет Да	100% Не проведен 100%	несоответствие
3	Наличие допуска к самостоятельной работе		Да	100%	
4	Наличие СИЗ (по перечню СИЗ на РМ)	В соответствии с перечнем	Да	100%	
5	Состояние и своевременность проверки СИЗ	В соответствии с нормами	Нет	60%	несоответствие
6	Наличие инструкций на РМ		Да	100%	

Заключение. По результатам исследования обоснована необходимость создания системы управления охраной труда, которая позволяет провести качественную оценку состояния охраны труда на машиностроительных предприятиях и порядка применения системы аудита СУОТ, что может быть использовано для выявления слабых

мест в системе управления охраной труда и, исходя из полученных результатов, принятия управленческих решений по поддержанию ее на заданных параметрах.

Финансовая поддержка. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/56

Список литературы

1. Новиков В.В. Экспресс-оценка риска на предприятиях машиностроения методами нейронных сетей / Новиков В.В., Литвинов А.Е., Стягун Д.И., Дудкин М.В. // В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Краснодар, 2022. С. 266-277.

2. Новиков В.В. Теоретические основы качественной (интегральной или обобщенной) оценки состояния бт на предприятиях с использованием квалиметрических методов / В Новиков В.В., Литвинов А.Е., Дудкин М.В., Стягун Д.И. // В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Краснодар, 2022. С. 259-265.

3. Solod S.A. Structuring information on the state of labor safety at mechanical engineering enterprises / Solod S.A., Novikov V.V., Litvinov A.E., Chukarin A.N. // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. "International Scientific and Practical Conference Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2020" 2020. С. 012112.

4. Finochenko T. Risk Management in Transportation Safety System/ Finochenko, T., Yizkov, I, Dergacheva, L // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 2. P. 144-145 (2021). Doi: 10.1088/1755-1315/666/2/022050.

5. Borisova A.V. The Use of the Expert Method in Solving the Issues of Choosing the Instrumentation of the Procedure for Controlling Production Factors/ Borisova, A.V., Finochenko, T.A., Finochenko, V.A. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; IOP Publishing ([Bristol, UK], England), Volume 666 № 2, 2021, doi:10.1088/1755-1315/666/2/ 022022. Doi: 10.1088/1755-1315/666/2/ 022022.

6. Новиков В.В. Управление персоналом на предприятиях машиностроения с применением процессного подхода / Новиков В.В., Согомонян Т.К., Солод С.А. // Главный механик. 2019. № 7. С. 55-62.

7. Согомонян Т.К. Улучшение состояния промышленной безопасности посредством применения процессного подхода/ Согомонян Т.К., Солод С.А., Солод А. А.// Технические науки - от теории к практике // Сборник статей по материалам XLVI Международной научно-практической конференции. Новосибирск: Изд. «СибАК», 2015. №5 (42). С. 87-91.

8. Согомонян Т.К. Процессный подход к информатизации управленческой деятельности промышленного предприятия / Согомонян Т.К., Солод С.А. // Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная. Материалы IV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 85-летию БГИТА (Брянск, 3-5 июня 2015 г.). Брянск, Изд-во БГИТА, 2015. С. 351-356. EDN: WOKGUH.

Новиков Валерий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, novikiv_v.v@mail.ru, Россия, Краснодар, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),

Литвинов Артем Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, artstyleone@mail.ru, Россия, Краснодар, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ),

Чукарин Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, opm@rgups.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),

Ксандопуло Светлана Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Россия, Краснодар, Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)

DEVELOPMENT OF EQUIPMENT TO INCREASE THE DURABILITY OF CUTTING TOOLS, IMPROVE THE ACCURACY AND QUALITY OF THE CUTTING PROCESS, REDUCING NOISE AND VIBRATION WHEN OPERATING BAND SAWING MACHINES

V.V. Novikov, A.E. Litvinov, A.N. Chukarin, S.Y. Ksandopulo

This article presents the results of the development of a complex device introduced into the design of band saw machines in order to increase the durability of the cutting tool, reduce noise and vibration when working on band saw machines, as well as increase the accuracy and productivity of the entire cutting process.

Key words: band saw machines, noise, vibration, stability of the cutting process, rigidity.

Novikov Valery Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, novikiv_v.v@mail.ru, Russia, Krasnodar, Kuban State Technological University (KubSTU),

Litvinov Artem Evgenievich, doctor of technical sciences, professor, artstyleone@mail.ru, Russia, Krasnodar, Kuban State Technological University (KubSTU),

Chukarin Alexander Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, opm@rgups.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State University of Railway Engineering (RGUPS),

Ksandopulo Svetlana Yurievna, doctor of technical sciences, professor, head of the department, Russia, Krasnodar, Kuban State Technological University (KubSTU)

УДК 658.56
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-482-483

ПРОЦЕСС ПОСТОЯННОГО УЛУЧШЕНИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

А.И. Кондратова

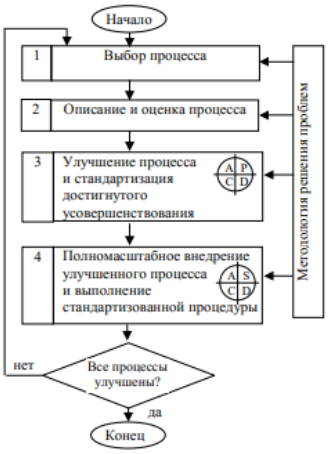
Рассматривается важность процесса постоянного улучшения на производстве для повышения эффективности и конкурентоспособности предприятий, а также применение цикла Деминга в этом процессе.

Ключевые слова: качество, управление качеством, цикл Деминга, эффективность

Современные предприятия сталкиваются с возрастающими стандартами в области качества продукции, с уменьшением времени производства и повышением уровня конкуренции на рынке. Процесс постоянного улучшения занимает важное место в стратегии операционного управления и способствует поддержанию конкурентоспособности предприятий.

Процесс постоянного улучшения является основой системы управления качеством и становится ключевым фактором успеха предприятий.

Рассмотрим графическую модель постоянного улучшения качества на рисунке.



Графическая модель процесса постоянного улучшения (развития) качества

Из рисунка видно, что процесс постоянного улучшения при каждом его новом повторении (на очередной итерации) можно рассматривать как процесс, состоящий из четырех стадий:

1. выбор процесса;
2. описание и оценка процесса;
3. улучшение процесса;
4. полномасштабное внедрение улучшенного процесса и выполнение стандартизованной процедуры.

При каждом новом повторении всех четырех стадий процесса постоянного улучшения (см. рисунок 1) следует постоянно использовать так называемую методологию решения проблем, представляющую собой детализацию известного цикла улучшения качества Plan – Do – Check – Act (PDCA) Деминга.

1. Выбор процесса. На первой стадии каждой итерации процесса постоянного улучшения осуществляется выбор процесса, который на данный момент является наиболее критическим (дефектоносным) и в первую очередь нуждается в усовершенствовании, либо представляет наибольшие возможности для улучшения.

При выборе такого процесса следует использовать:

− результаты внутренних и внешних аудитов;

− результаты анализа данных, предоставляющих информацию:

а) об удовлетворенности потребителей,

б) по определению требований к продукции,

в) по мониторингу и измерению процессов и продукции;

− результаты корректирующих и предупреждающих действий;

− результаты анализа со стороны руководства,втомчисле, анализа политики и целей в области качества.

В результате выполнения первой стадии должно быть сделано следующее:

1) осуществлен выбор критического, который представляет наибольшую значимость, поскольку является либо источником самых серьезных трудностей, требующих разрешения, либо предоставляет наибольшие возможности для улучшения;

2) сформирована команда из экспертов различных подразделений, связанных с рассматриваемым процессом, которая в дальнейшем будет заниматься улучшением данного процесса;

3) определены цели усовершенствования.

2. Описание и оценка процесса. На втором этапе специалисты сформированной рабочей группы определяют границы и составляют описание ранее выбранного процесса в том виде, в котором он осуществлялся до текущего момента. В случае необходимости, посредством проведения мониторинга и замеров в ходе протекания процесса, проверяется – корректно ли понят и документирован этот процесс, отвечает ли он требованиям пользователей. Мониторинг и измерения в ходе действующего процесса позволяют:

− локализовать симптомы имеющейся проблемы;
− понять возможные причины этой проблемы;
− определить возможные пути улучшения процесса;
− сформировать мнение о требующихся изменениях;
− обеспечить уверенность, что требования потребителей будут
выполнены;
− определить существующее положение дел как основу для последующего сравнения;
− сформировать индикаторы (показатели) для оценки уровня
выполнения процесса
Выполнение процесса может быть описано и оценено с применением:
− основных (простых, старых) методов и инструментов контроля и управления качеством;
− новых методов и инструментов улучшения качества;
− комплексных инструментов и методологий улучшения качества.

3. Улучшение процесса

На этой стадии осуществляется собственно улучшение процесса.

При этом следует использовать методологию решения проблем, представляющую собой детализированный вариант цикла улучшения Plan–Do–Check–Act (PDCA) Деминга .

Цикл улучшения PDCA Деминга включает в себя четыре фазы и предусматривает выполнение следующих действий:

Планируйте (Plan) улучшение. Необходимо определить проблему, разработать анкету (опросный лист), собрать необходимую информацию, проанализировать доступные данные о процессе, определить критические факторы успеха, определить показатели (индикаторы) и критерии осуществления процесса, а так же установить цели улучшения, позволяющие осуществить их. Несмотря на то, что большая часть этих подготовительных действий была уже выполнена на первых двух этапах, желательно на этом этапе рассмотреть их еще раз и заново обдумать.

Делайте (Do), выполняйте запланированное. Сначала осуществите план или решение в малом масштабе, проверьте выбранное решение и, если надо, выполните эксперименты. Опишите подлежащий улучшению процесс, осуществите причинно-следственный анализ (диаграмма Исикавы), идентифицируйте корневые (главные) причины. Проведите тренировку членов команды по использованию методов и средств улучшения качества.

Проверяйте (Check). Оцените результаты осуществления запланированного с помощью показателей (индикаторов) и критериев выполнения процесса, проверьте, достигнуты ли цели, и сравните результаты с нормами или теорией. При необходимости (если улучшение не достигнуто) начните работу с начала цикла PDCA.

Действуйте (Act). Достигнутое улучшение процесса должно быть превращено в стандартную процедуру, в соответствии с которой в каждый последующий момент времени этот процесс мог быть осуществлен одинаковым образом при минимальной изменчивости (вариации) его характеристик.

4. Полномасштабное внедрение улучшенного процесса и выполнение стандартизованной процедуры. Если запланированное и осуществленное в малом масштабе усовершенствование привело к необходимому улучшению процесса, то полученные результаты надо внедрить в практическую деятельность организации.

У предприятия есть процессы, которые могут быть определены, измерены и улучшены. Эти процессы взаимодействуют для достижения результатов, соответствующих целям организации, и пересекают функциональные границы. Некоторые процессы могут иметь важное значение, а другие - нет. Действия, составляющие процессы, преобразуют входы в выходы.

В заключение важно отметить, что применение цикла Деминга для процесса постоянного улучшения на производстве является эффективным инструментом управления качеством. Этот подход позволяет предприятию систематически улучшать свои производственные процессы, повышать качество продукции и удовлетворение клиентов.

Список литературы

1. "ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Требования". М., 2015.

2. Фролова Ирина Ивановна, Кулиев Эльнар Атамалиевич Совершенствование процесса постоянного улучшения в системе менеджмента качества // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. 2022. №2 (60). С. 60-65.

3. Безбородова И.В. Применение метода постоянного улучшения на основе цикла PDCA // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. №4-4. С. 852-860.

Кондратова Анастасия Игоревна, аспирант, an.kondratova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

PROCESS OF CONTINUOUS IMPROVEMENT IN PRODUCTION

A.I. Kondratova

The importance of the process of continuous improvement in production to increase the efficiency and competitiveness of enterprises, as well as the application of the Deming cycle in this process, is considered.

Key words: quality, quality management, Deming cycle, efficiency.

Kondratova Anastasia Igorevna, an.kondratova@mail.ru, postgraduate, Russia, Tula, Tula State University

УДК 629.113
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-484-485

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ ПОВЕДЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ ВЫБОРЕ ЭЛЕКТРОИНСТРУМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ПОКУПКИ

М.М. Васильев, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров

В статье представлены результаты исследования оценки основных принципов поведения потребителей при выборе электроинструментов в процессе покупки.

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, электроинструмент; потребительское поведение.

В статье предложены результаты комплексного анкетного исследования клиентской среды на предмет оценки потребительского качества новых электроинструментов.

Анализ потребительских предпочтений [1 – 3] пользователей электроинструментов, свидетельствует о следующем. Оценка результатов ответов на вопрос «В создавшейся экономической ситуации, какое из перечисленных утверждений в большей степени соответствует Вашему отношению к покупке нового электроинструмента?» показывает то, что большинство – 43,3% опрошенных респондентов «Купят инструмент известных импортных марок, несмотря на то, что он существенно подорожал», еще 24,3% опрошенных респондентов «Купят инструмент отечественной марки», а 11,0% опрошенных респондентов «Отложат покупку до лучших времен, из-за отсутствия острой необходимости в нем» (рисунок 1).

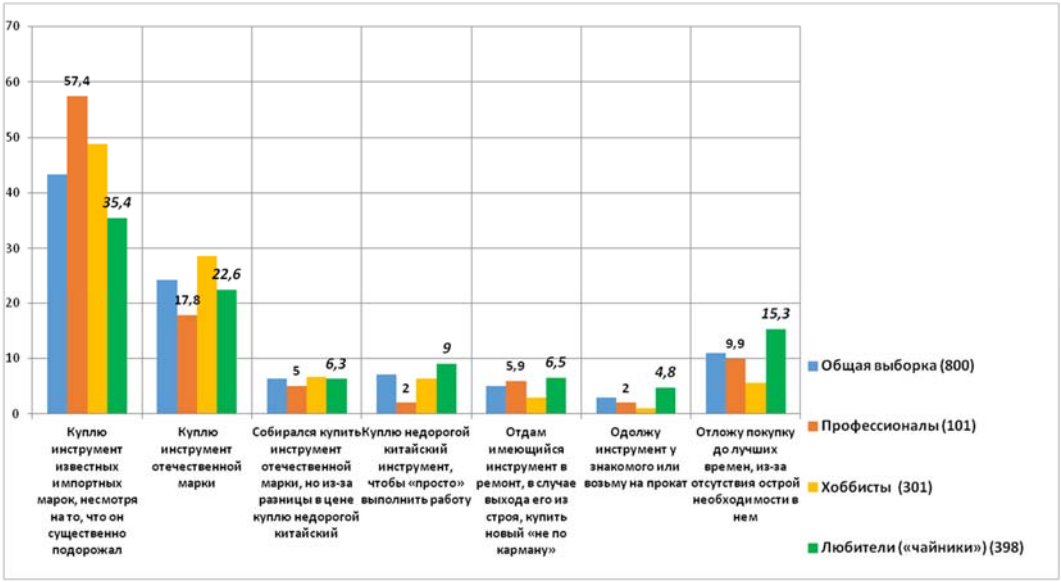


Рис. 1. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «В создавшейся экономической ситуации, какое из перечисленных утверждений в большей степени соответствует Вашему отношению к покупке нового электроинструмента?» (в разрезе «профессионал» - «хоббисты» - «любитель»)

При покупке следующего электроинструмента, главным фактором для принятия решения о покупке для опрошенных респондентов окажется уровень надежности инструмента для 85,6% опрошенных. На втором месте оказался фактор цены – для 58,6% опрошенных респондентов и лишь на третьем месте оказался фактор «соотношения цены и качества» для 38,2% опрошенных респондентов (рисунок 2).

Кроме того, по результатам настоящего исследования значимым оказался фактор «производительности» - для 34,8% опрошенных респондентов. При этом данный фактор оказался более значимым, чем фактор «соотношение цена – качество» для профессиональных пользователей и «не профессиональных пользователей, рассматривающих свою работу с электроинструментами в качестве хобби». В то время как для «любителей» время от времени пользующихся электроинструментом фактор «производительности» существенно уступает «соотношению цена – качество». Аналогичная тенденция прослеживается и в отношении фактора «цены», более значимого для «любителей» время от времени пользующихся электроинструментом [4, 5].

С точки зрения перспективы оценки потребительских предпочтений пользователей при покупке ручного электроинструмента наибольший интерес представляют результаты ответов на прямые вопросы: «Укажите, пожалуйста, какой вид электроинструмента….» и «…….каких марок Вы планируете приобрести в ближайшей перспективе?». Полученные результаты ответов на данный вопрос представлены на рисунках 3, 4. Они свидетельствуют о том, что при выборе продукции, потенциальные покупатели рассматривают в среднем более 2 вариантов покупки отдельных марок и менее 2 вариантов отдельных видов электроинструментов. В марочном выборе большинство опрошенных респондентов предпочитают при потенциальном выборе Bosch (суммарно 14,1%), Makita (18.9% опрошенных) и «Интерскол» (13,4% опрошенных).

Следует отметить, что при перспективном выборе электроинструментов отдельных марок большая часть участников опроса в общем отдают своё предпочтение продукции марки «Makita» - 42,80% от общего выбора респондентов, еще 31,8% опрошенных в общей группе респондентов отдают предпочтение продукции марки «Bosch». Продукции выпускаемой под маркой «Интерскол» в целом отдают свое предпочтение еще 30,2% респондентов.

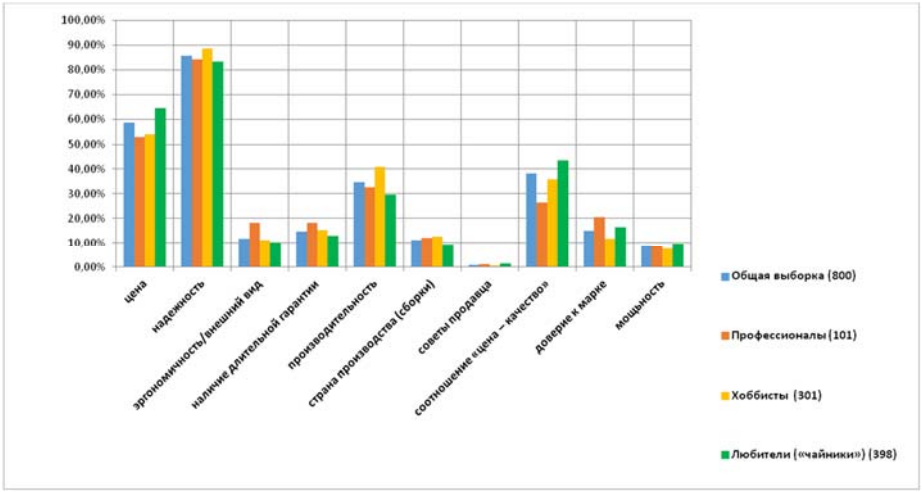


Рис. 2. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «При покупке следующего электроинструмента, что будет для Вас главным фактором для принятия решения о покупке?» (в разрезе «профессионал» - «хоббисты» - «любитель»)

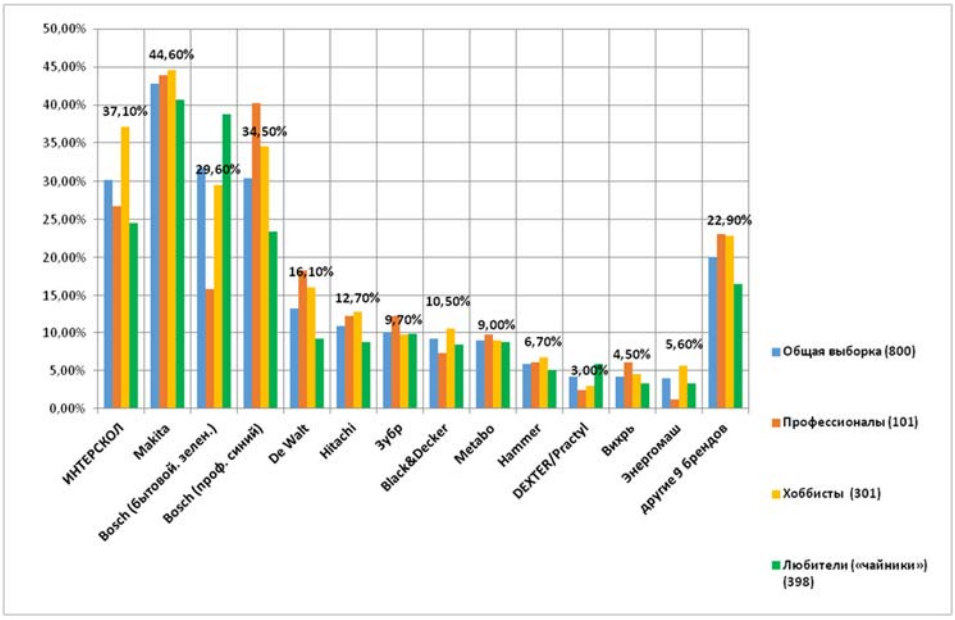


Рис. 3. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «Укажите, электроинструмент, каких марок Вы планируете приобрести в ближайшей перспективе» (в разрезе «профессионал» - «хоббисты» - «любитель»)

Кроме того вызвала интерес более чем у 10% ответивших респондентов продукция еще трех марок, это: «De Walt» (13,30%), «Hitachi» (10,90%) и «Зубр» (10,10%).

Не зависимо от принадлежности к той или иной группе пользователей лидирующие позиции в каждой из них занимает продукция марки «Makita». При этом продукция марки «Интерскол» занимает вторую позицию по популярности среди «не профессиональных пользователей, рассматривающих свою работу с электроинструментами в качестве хобби», а в остальных группах третью.

В категории «любителей» время от времени пользующихся электроинструментом вторую позицию по популярности занимает продукция марки «Bosch (бытовой зелен.)», а среди профессиональных пользователей продукция марки «Bosch (синий проф.)».

При выборе отдельных видов электроинструментов большинство опрошенных респондентов рассматривают для потенциальной покупки Дрели аккумуляторные (31,6% опрошенных), Сетевые дрели (13,6% опрошенных), Перфораторы (20.5% опрошенных), Садовую технику (15,0% опрошенных) и Эл. Лобзики (13,1% опрошенных).

Оценка перспективы ценовых предпочтений пользователей при покупке ручного электроинструмента, сделанная по результатам ответов на вопрос: «В каком ценовом диапазоне Вы планируете приобрести в ближайшей перспективе электроинструмент или оборудование в ближайшей перспективе?» свидетельствует о том, что наибольший интерес пользователей вызывает покупка электроинструментов в средних ценовых диапазонах «от 2500 рублей до 6500 рублей» (для 58,7% опрошенных). В особенности в диапазоне «от 3500 до 4500 рублей» (19,1% опрошенных в целом). Данная тенденция фактически дублируется в группах не профессиональных пользователей электроинструментов (рисунок 5). Среди профессиональных пользователей наиболее популярными ценовыми диапазонами являются: «от 4500 до 6500 рублей» (для 23,2% опрошенных) и «свыше 7500 рублей) (для 32,2% опрошенных).

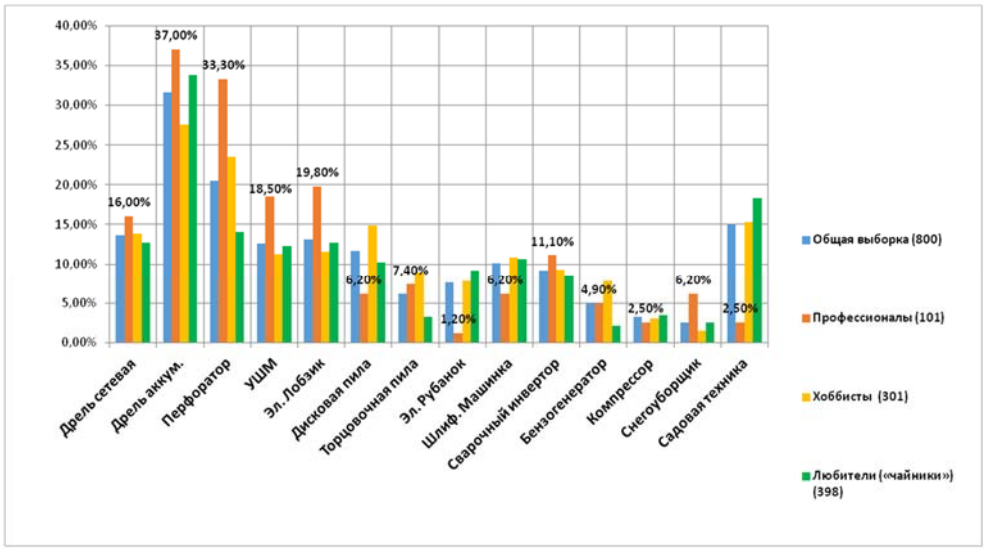


Рис. 4. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «Укажите, электроинструмент, каких видов Вы планируете приобрести в ближайшей перспективе» (в разрезе «профессионал» - «хоббисты» - «любитель»)

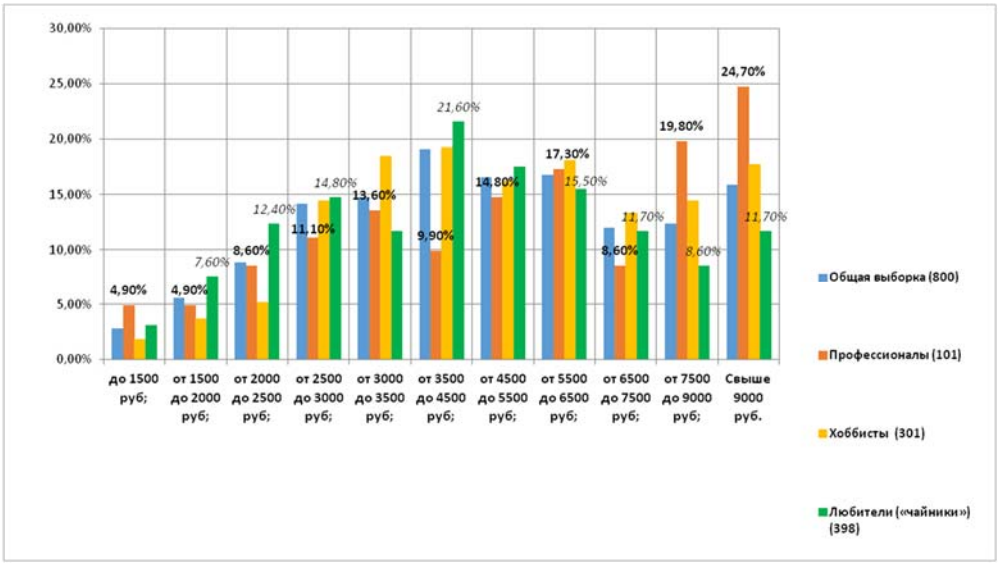


Рис. 5. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «В каком ценовом диапазоне Вы планируете приобрести в ближайшей перспективе электроинструмент или оборудование в ближайшей перспективе?» (в разрезе профессионалов – любителей)

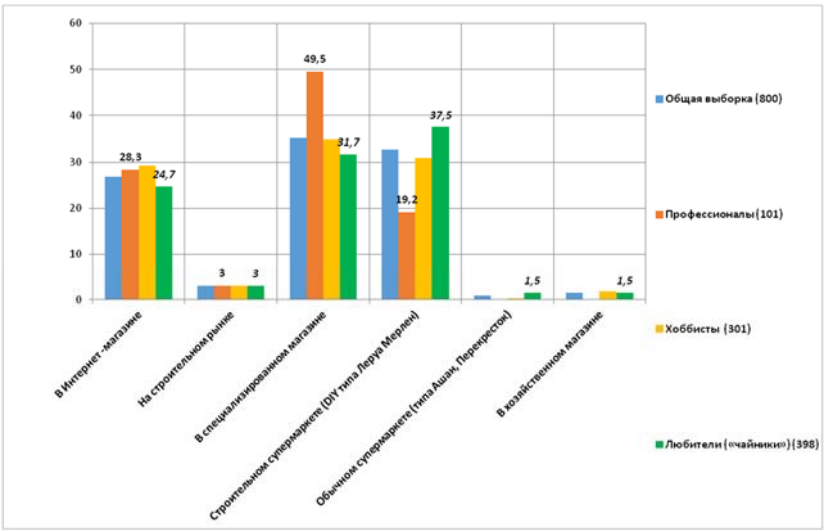


Рис. 6. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «Где преимущественно совершались покупки имеющегося у Вас инструмента?» (в разрезе профессионалов – любителей)

Относительно выбора места покупки электроинструментов опрошенными пользователями в целом предпочтения отдавались специализированным магазинам (35,1% опрошенных), строительным супермаркетам DIY формата (32,7% опрошенных) и интернет магазинам (26,9% опрошенных). Результаты ответов на вопрос: «Где преимущественно совершались покупки имеющегося у Вас инструмента?» представлены на диаграмме и в таблице (рис. 6).

Относительно выбора места бедующей покупки электроинструментов опрошенными пользователями тренд существенно изменился, так в качестве основного места перспективной покупки рассматриваются интернет магазины (36,6% опрошенных). Столь ощутимый прирост происходит за счет роли специализированных магазинов (всего 30,4% опрошенных) и строительных супермаркетов DIY формата (29,1% опрошенных). Результаты ответов на вопрос: «Где преимущественно Вы планируете совершать покупки следующего инструмента?» представлены на диаграмме и в таблице (рисунок 7).

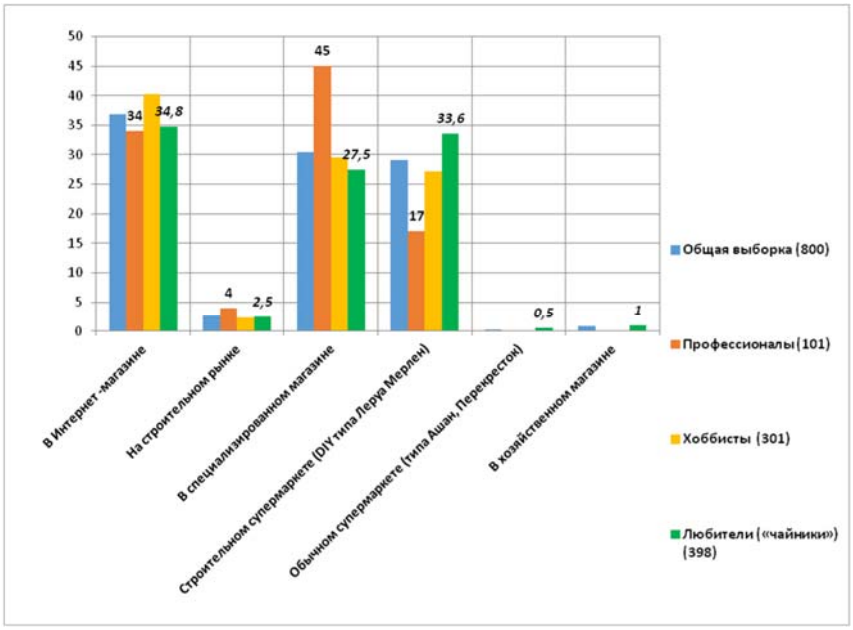


Рис. 7. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «Где преимущественно Вы планируете покупать инструмент?» (в разрезе профессионалов – любителей)

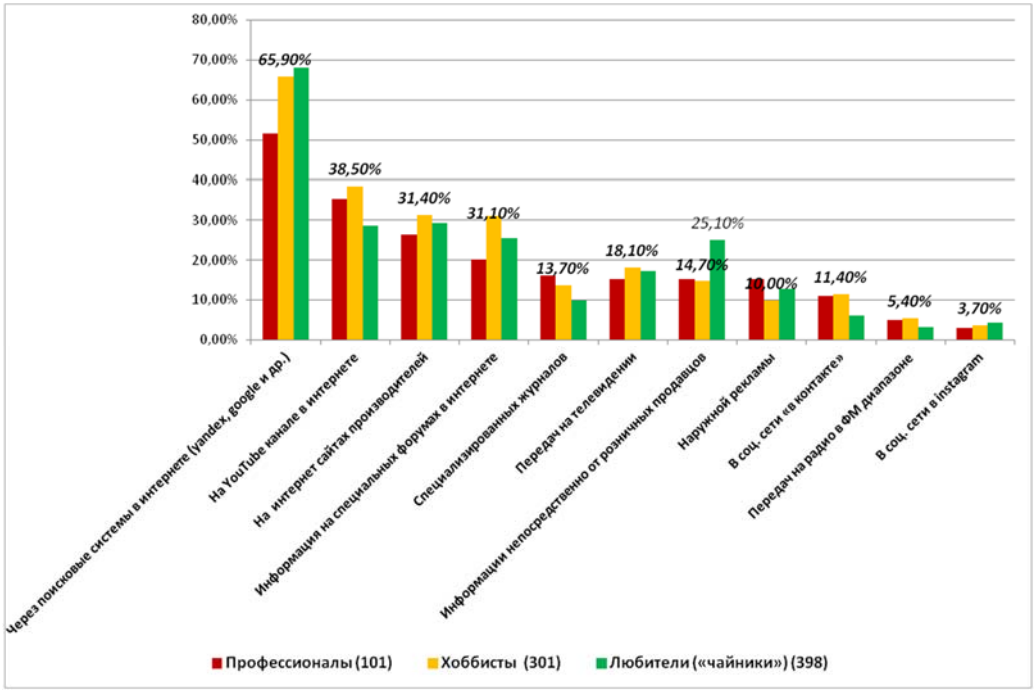


Рис. 8. Диаграмма результатов ответов на вопрос: «Из каких источников информации Вам удобнее всего узнавать о новинках и новых технологических решениях реализованных в современных электроинструментах» (в разрезе профессионалов – любителей)

В ходе проведения опроса его участникам был задан вопрос: «Из каких источников информации Вам удобнее всего узнавать о новинках и новых технологических решениях реализованных в современных электроинструментах и средствах малой механизации?», результаты ответов на который позволили оценить уровень влияния

каждого из источников на современных пользователей электроинструментами (рисунок 8). Проведенная оценка полученных результатов свидетельствует о том, что в качестве основного источника информации пользователями рассматриваются «Поисковые системы в интернете (yandex, google и др.)». Второе место по уровню влияния занял информационный канал «YouTube канал в интернете», который в целом выбрали 33,2% опрошенных респондентов, при этом для профессиональных пользователей он оказался более значимым – 35,4% опрошенных «профессионалов», для «не профессионалов рассматривающих работу инструментом в качестве хобби» он оказался еще более значимым – 38,5% ответов респондентов. В то время как для «любителей лишь время от времени пользующихся инструментом» - 28,6% опрошенных, он оказался лишь на третьем месте вслед за «Информацией на специализированных интернет сайтах производителей». Третье место по уровню влияния занял информационный канал «Интернет сайтов производителей», который в целом выбрали 29,8% опрошенных респондентов, при этом для профессиональных пользователей он оказался менее значимым – всего 26,3% опрошенных «профессионалов», для «не профессионалов рассматривающих работу инструментом в качестве хобби» он оказался более значимым – 31,4% ответов респондентов. В то время как для «любителей лишь время от времени пользующихся инструментом» фактически совпал с «общим мнением» - 29,4% опрошенных. Четвертое место по уровню влияния занял информационный канал «Специальных форумов в интернете», который в целом выбрали 27,0% опрошенных респондентов, при этом для профессиональных пользователей он оказался менее значимым всего 22,2% опрошенных «профессионалов», однако для «не профессионалов рассматривающих работу инструментом в качестве хобби» он оказался более значимым – 31,1% ответов респондентов. В то время как для «любителей лишь время от времени пользующихся инструментом» - 25,6% опрошенных.

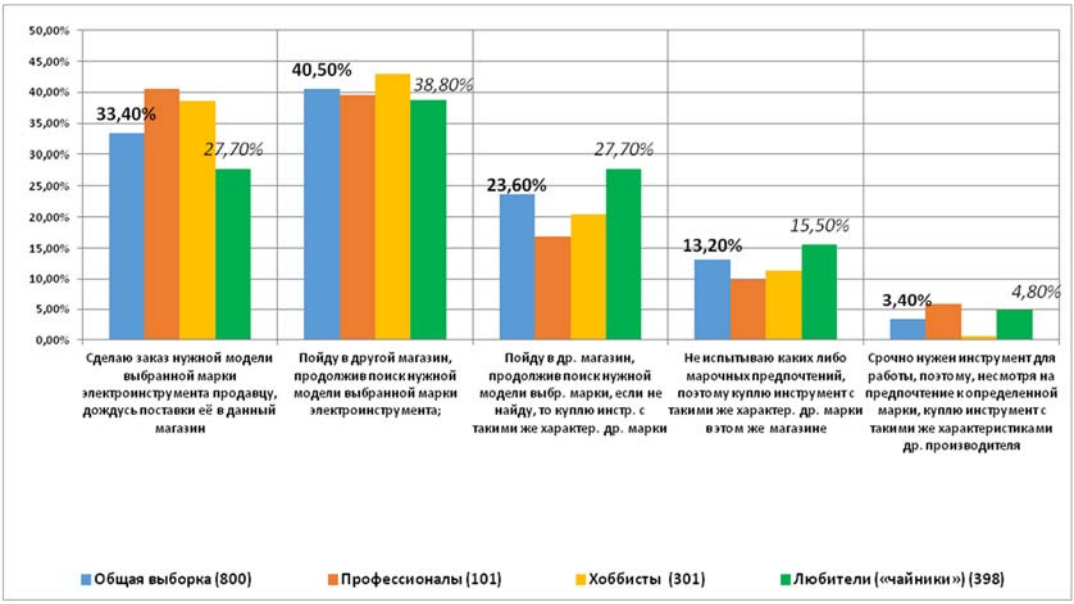


Рис. 9. Диаграмма результатов ответов на вопрос: Результаты ответов на вопрос: «Каковы будут Ваши действия, если в магазине не окажется нужной модификации электроинструмента выбранной марки» (в разрезе профессионалов – любителей)

Кроме того следует обратить внимание на уровень влияния информационного канала «Информации непосредственно от розничных продавцов», который в целом выбрали 19,9% опрошенных респондентов. При этом для профессиональных пользователей он оказался менее значимым всего 15,2% опрошенных «профессионалов», для «не профессионалов рассматривающих работу инструментом в качестве хобби» он оказался еще менее значимым – 14,7% ответов респондентов.

В процессе поиска нужной модели большинство опрошенных респондентов при отсутствии нужной модификации электроинструмента выбранной марки пойдут в другой магазин продолжив поиск нужной модели инструмента (40,5% опрошенных респондентов). При этом данный вариант является самым популярным среди двух групп респондентов – «любителей». Ещё 33,4% респондентов сделают заказ нужной модели выбранной марки и дождутся её поставки (данный вариант лидирует среди профессиональных пользователей), также 23,6% респондентов если не найдут, то купят инструмент другой марки с такими же характеристиками. Результаты ответов на вопрос «Каковы будут Ваши действия, если в магазине не окажется нужной модификации электроинструмента выбранной марки?» представлены на рисунке 9.

Список литературы

1. 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. Инновационные механизмы управления потенциалом сферы сервиса в регионе. Тольятти, 2013.

2. Козловский В.Н. Цифровая среда поддержки управления конкурентоспособностью / В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, Д.И. Панюков, М.М. Васильев // Стандарты и качество. 2018. № 6. С. 86-89.

3. Kozlovskiy V. Analytical models of mass media as a method of quality management in the automotive industry / V. Kozlovskiy, D. Aydarov // Quality - Access to Success. 2017. Т. 18. № 160. С. 83-87.

4. Панюков Д.И. Проектирование новых производственных процессов / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Г.Г. Слистина // Стандарты и качество. 2014. № 11. С. 92-95.
5. Козловский В.Н. Аналитический комплекс прогнозирования надежности электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В.Н. Козловский, Н.И. Горбачевский, А.Г. Сорокин, В.Б. Кислинский, Л.Х. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 3. С. 227-229.

Васильев Максим Михайлович, аспирант, vasmarket@mail.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,

Айдаров Дмитрий Васильевич, д-р техн. наук, профессор, adv_tol@mail.ru, Россия, Самара, Самарский государственный технический университет

ASSESSMENT OF THE BASIC PRINCIPLES OF CONSUMER BEHAVIOR WHEN SELECTING POWER TOOLS DURING THE PURCHASE PROCESS

M.M. Vasiliev, V.N. Kozlovsky, D.V. Aidarov

The article presents the results of a study assessing the basic principles of consumer behavior when choosing power tools during the purchasing process.
Key words: competitiveness, quality, power tools; consumer behavior.

Vasiliev Maxim Mikhailovich, postgraduate, vasmarket@mail.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,

Aidarov Dmitry Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, adv_tol@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Technical University

УДК 621.9.08
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-489-490

ЭФФЕКТИВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА КИМ

С.М. Никольский

В настоящей статье рассмотрены эффективные способы выполнение контактных измерений на КИМ, даны рекомендации по их выполнению для минимизации возможных погрешностей. Даны рекомендации по выбору измерительного наконечника в зависимости от поставленной задачи.
Ключевые слова: КИМ, измерения, контактный датчик, диаметр, положение, погрешность.

В соответствии с руководством по эксплуатации КИМ, любые измерения контактным датчиком должны проводиться строго перпендикулярно измеряемому элементу для минимизации возможных погрешностей и «проскальзывания» наконечника (рисунок 1).

Контактные щупы, используемые в координатно-измерительных машинах, имеют конструкцию, позволяющую добиваться оптимальных результатов, когда наконечник щупа касается детали перпендикулярно корпусу щупа. В идеале, чтобы избежать проскальзывания наконечника щупа, нужно совершать касания внутри конуса ±20° вокруг перпендикуляра. Проскальзывание порождает недостоверные, неповторяемые результаты.

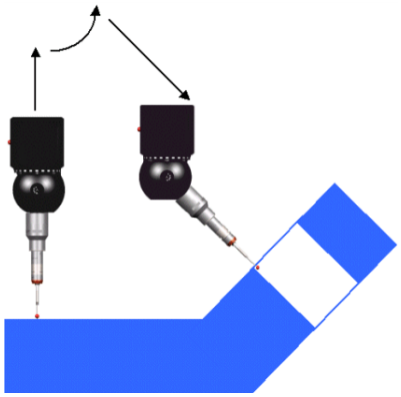


Рис. 1. Положение измерительной головки при проведении измерений

Касания, параллельные корпусу датчика, то есть вдоль оси щупа, так же не являются повторяемыми, в отличие от взятых перпендикулярно оси (рисунок 2).

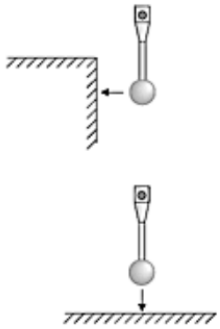


Рис. 2. Параллельное и перпендикулярное положение измерительной головки

Касания датчиком, которые ни перпендикулярны, ни параллельны корпусу датчика, дают результаты, которые будут менее повторяемые, чем те, которые получаются в результате касаний параллельно корпусу датчика. Следует избегать касаний датчика параллельно щупу и под углом к корпусу датчика, поскольку они дают большие ошибки.

Касание стержнем щупа является другой причиной ошибок измерения. Когда датчик касается детали стержнем щупа, а не его наконечником, измерительная система считает это касание нормальным, и возникают большие ошибки. Следует избегать использования измерительных наконечников с длинными хвостовиками. Повышенная гибкость хвостовика может привести к внесению дополнительной погрешности в измерения. Перед проведением измерений необходимо проверять щуп на предмет корректного соединения, в частности, ножку следует закручивать соответствующим ключом из комплекта.

Уменьшить вероятность проскальзывания можно путем увеличения диаметра наконечника, увеличивая зазор между шаром/стержнем и поверхностью детали. В общем случае, чем больше диаметр наконечника щупа, тем глубже может проникнуть щуп, прежде чем он коснется поверхности детали. Это называется эффективной рабочей длиной датчика (рисунок 3). Кроме того, чем больше наконечник, тем меньше он оказывает влияние на состояние поверхности детали, поскольку точка контакта будет занимать большую площадь на поверхности измеряемой детали. Тем не менее, размер наконечника, который можно использовать, ограничен размером самых маленьких измеряемых отверстий.

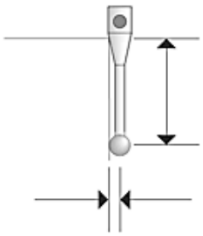


Рис. 3. Эффективная рабочая длина датчика

Точки измерения, получаемые с помощью электронного датчика, регистрируются в момент, когда щуп отклоняется на величину, достаточную для того, чтобы разомкнуть механический контакт или создать усилие для замыкания цепи, чувствительной к давлению. Физическая конструкция контактов вызывает небольшие погрешности, хотя они уменьшаются в ходе калибровки датчика. Тем не менее, чем длинней стержень щупа, тем больше будет ошибка рабочего хода и остаточная ошибка, которая остается после калибровки датчика. Более длинные щупы не такие жесткие, как короткие. Чем больше щуп изгибается или смещается, тем ниже точность измерений. Следует избегать эксплуатацию датчиков с очень длинным щупом и удлинителем, используемыми одновременно.

Учитывая приведенные рекомендации по выбору измерительного наконечника и способу проведение контактных измерений можно существенно минимизировать возникающие погрешности [1, 2].

Список литературы

1. Никольский С.М. Исследование влияния количества калибровочных точек на результат измерений с применением КИМ. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №9. С. 380-385.

2. Никольский С.М., Соловьев С.И. Источники погрешностей координатных измерений и способы минимизации их влияния. // Вестник науки. 2021. Т. 1. № 6-1 (39). С. 217-224.

Никольский Сергей Михайлович, инженер по метрологии, nikolsky.serge@yandex.ru, Россия, Тула, АО «АК «Туламашзавод»

EFFECTIVE PERFORMANCE OF CONTACT MEASUREMENTS ON THE CMM

S.M. Nikolsky

In this article, effective methods of performing contact measurements on the CMM are considered, recommendations for their implementation are given to minimize possible errors. Recommendations on the choice of the measuring tip are given.

Key words: CMM, measurements, contact sensor, diameter, position, error.

Nikolsky Sergey Mikhailovich, metrology engineer, nikolsky.serge@yandex.ru, Russia, Tula, JSC "Tulamashzavod"

УДК 621.787
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-491-492

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА УПРОЧНЁННОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

А.Е. Хачкинаян

Рассмотрено влияние режимов наплавки и накатки роликами наплавленного металла на качество поверхностного слоя восстанавливаемой детали. С учётом проведенных теоретических расчётов и практических результатов, разработана номограмма выбора оптимальных режимов накатки роликами наплавленного металла, позволяющая быстро определить режимы упрочнения металла, наплавленного при восстановлении изношенных цилиндрических деталей.

Ключевые слова: наплавленный металл, накатка роликами, режимы наплавки и накатки, номограмма, усилие накатки, глубина наклёпа, качество металлопокрытия.

Опыт передовых ремонтных предприятий железнодорожного транспорта показывает, что использовать остаточный ресурс долговечности у изношенных цилиндрических деталей по прочности весьма эффективно с помощью наплавки. Доля износостойкой наплавки повышенной твердости, получаемой в результате использования легированных проволоки и флюса, в ремонтном производстве составляет более 50 %. Но значительным тормозом в применении износостойких наплавок является трудность их механической обработки.

Для наплавленного металла характерны: значительный разброс механических свойств; нестабильность структуры и неравномерность поверхностной твёрдости по длине детали; наличие включений и металлургических дефектов; наличие неблагоприятных растягивающих напряжений; снижение усталостной прочности наплавленных деталей. Разброс механических свойств наплавленного металла ведет к снижению важной характеристики металла – износостойкости.

В РГУПСе разработаны технологический метод и установка, позволяющие при восстановлении изношенных деталей использовать тепло сварочной дуги путем совмещения в одной технологической схеме процессов автоматической электродуговой наплавки под флюсом цилиндрических деталей и упрочняющей обработки накатными роликами нанесённого слоя металла (рис. 1). Упрочнение наплавленного металла в процессе его наплавки накатными роликами позволяет улучшить структуру и уменьшить число дефектов в наплавленном слое, повысить поверхностную твёрдость и износостойкость наплавки, увеличить усталостную прочность ремонтируемых деталей, получить на поверхности и по глубине наплавки благоприятные сжимающие напряжения. Всё это способствует увеличению надежности и долговечности наплавленных деталей [1, 2].

При накатке роликами наплавленного слоя от режима наплавки, марки наплавочной проволоки и флюса, размера и скорости вращения детали в процессе наплавки, количества вводимого сварочной дугой тепла зависят режимы упрочняющей обработки, формирование и качество поверхностного слоя восстанавливаемой детали.

Качество нанесенного слоя металла во многом зависит от выбора режимов процесса восстановления детали. При разработке режимов наплавки в качестве исходных данных принимаются: форма и размеры восстанавливаемых поверхностей; величина износа; твердость наплавляемой детали. При выборе величины сварочного тока можно пользоваться эмпирической формулой [1, 2, 10]:

$$I_{\text{св.}} = 40 \cdot \sqrt[3]{D}\text{, А,}$$

где D – диаметр наплавляемой детали, мм.

Напряжение источника питания вычисляем по формуле [1, 2, 10]:

$$U = 21 + 0{,}04 \cdot I_{\text{св.}}\text{, В.}$$

При выборе режимов наплавки также необходимо учитывать некоторые практические рекомендации. С увеличением силы тока глубина проплавления и высота валика возрастают, а ширина шва изменяется незначительно; увеличение проплавления ведет к возрастанию доли металла подложки в наплавленном слое и, следовательно, к уменьшению концентрации легирующих элементов в нем. Поэтому величина тока должна быть минимальной, но обеспечивающей устойчивое горение дуги. Увеличение напряжения дуги ведет к некоторому уменьшению глубины проплавления основного металла детали и резкому увеличению ширины наплавленного валика.

Для быстрого выбора режимов наплавки был установлен оптимальный диапазон (заштрихованная область) применяемых величин сварочного тока и напряжения сварочной дуги для различных диаметров восстанавливаемых деталей (рис. 3 и 4).

Необходимую толщину наплавляемого слоя можно определить по формуле [1, 2, 3]:

$$h = \delta_{\text{И}} + \delta_{\text{П}} + \delta_{\text{Ч}} + \delta_{\text{О}}\text{, мм,}$$

где $\delta_{\text{И}}$ – толщина изношенного слоя поверхности детали, мм; $\delta_{\text{П}}$ – припуск на механическую обработку изношенной детали перед наплавкой, мм; $\delta_{\text{Ч}}$ – припуск на черновую обработку наплавленного слоя металла, мм; $\delta_{\text{О}}$ – припуск на чистовую обработку наплавленного слоя металла, мм.

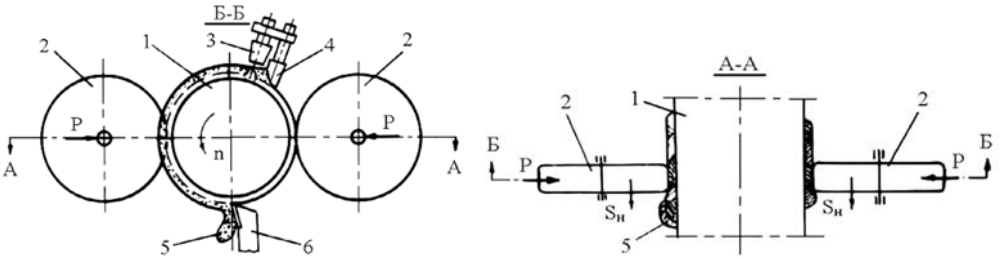


Рис. 1. Схема наплавки и накатки самоцентрирующимися роликами: 1 – деталь; 2 – накатные ролики; 3 – мундштук наплавочного автомата; 4 – флюсопровод; 5 – шлаковая корка; 6 – резец шлакоудаляющего устройства

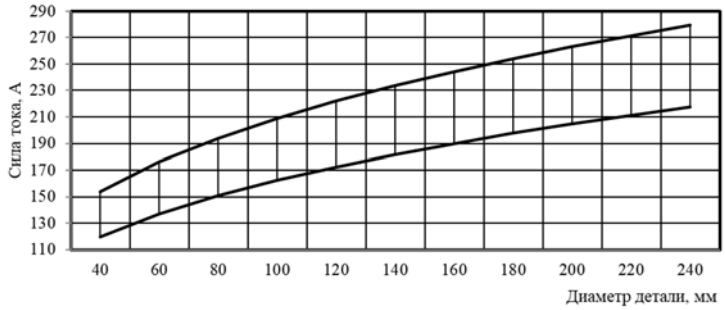


Рис. 2. Оптимальные значения величины сварочного тока в зависимости от диаметра детали

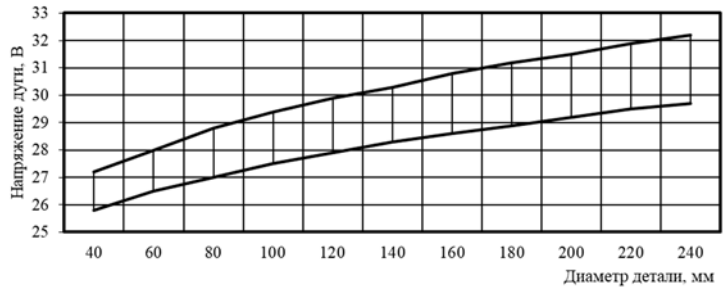


Рис. 3. Оптимальные значения напряжения сварочной дуги в зависимости от диаметра детали

Искомую величину рассчитывают для каждой наплавляемой детали отдельно, исходя из предъявляемых к ней требований и вариантов обработки.

Шаг наплавки определяется перекрытием наплавляемых валиков и влияет на волнистость поверхности наплавленного слоя металла детали [4, 10]:

$$S_{\text{н}} = (2...2{,}5) \cdot d, \text{ мм},$$

где d – диаметр наплавочной проволоки, мм.

Результаты проведенных расчетов для различных вариантов сведены в график (рис. 4).

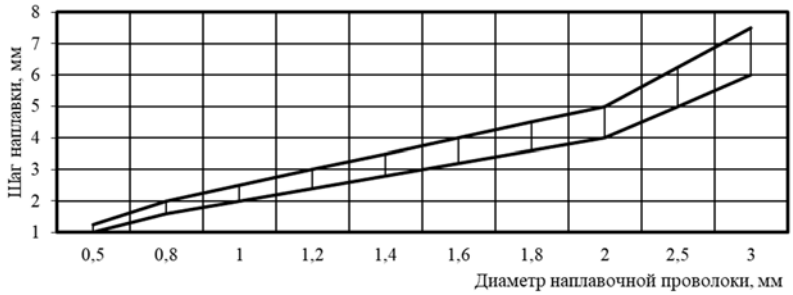


Рис. 4. Оптимальные значения шага наплавки в зависимости от диаметра проволоки

Скорость подачи наплавочной проволоки определяется возможностью её полного расплавления и рассчитывается по формуле [2, 5]:

$$V_{\text{э}} = \frac{4 \cdot K_{\text{н}} \cdot I_{\text{св.}}}{\pi \cdot d^2 \cdot \gamma}, \text{ м/ч},$$

где $K_{\text{н}}$ – коэффициент наплавки, $\text{г}/\text{А} \cdot \text{ч}$; γ – плотность наплавленного металла шва, $\text{г}/\text{см}^3$.

Коэффициент наплавки можно вычислить по формуле [1, 6]:

$$K_{\text{н}} = 2{,}3 + \frac{0{,}065 \cdot I_{\text{св.}}}{d},\ \text{г/А} \cdot \text{ч}.$$

Увеличение вылета наплавочной проволоки повышает электрическое сопротивление цепи и отражается на геометрии наплавленных валиков. Вылет наплавочной проволоки можно определить по формуле [7, 10]:

$$H = (10...12) \cdot d,\ \text{мм}.$$

Скорость наплавки обусловливается требуемой шириной, высотой наплавленных валиков и глубиной проплавления основного металла детали и может быть найдена по формуле [8, 10]:

$$V_{\text{н}} = \frac{K_{\text{н}} \cdot I_{\text{св.}}}{h \cdot S_{\text{н}} \cdot \gamma},\ \text{м/ч}.$$

Большое значение при наплавке тел вращения по винтовой линии для формирования слоя имеет правильный выбор смещения электрода с зенита, которое определяется по формуле [2, 9]:

$$e = (0{,}05...0{,}07) \cdot D,\ \text{мм}.$$

Угол наклона самого электрода относительно детали может составлять 0...8 град. Результаты расчетов оптимальных величин вылета электрода и его смещения с зенита относительно наплавляемой детали сведены в графики (рис. 5 и 6), и на них заштрихован оптимальный режим.

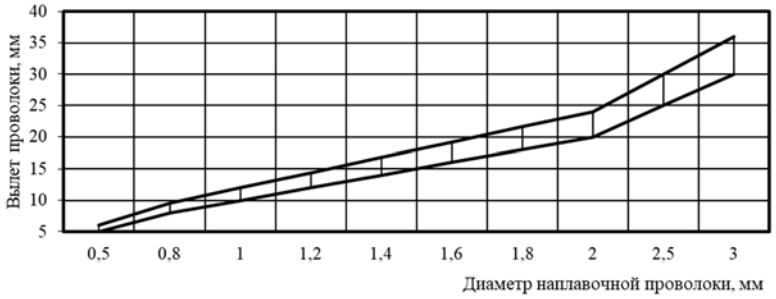


Рис. 5. Оптимальные значения вылета электродной проволоки в зависимости от её диаметра

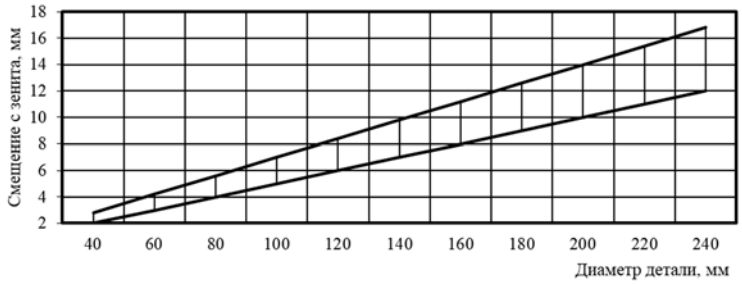


Рис. 6. Оптимальные значения смещения проволоки с зенита в зависимости от диаметра детали

К основным параметрам режима упрочнения наплавленного слоя металла относятся: глубина наклёпанного слоя металла; усилие накатывания; диаметр накатных роликов; диаметр наплавляемой и накатываемой детали; осевая подача роликов; скорость накатывания; число проходов роликом. От выбранных значений этих параметров зависит шероховатость поверхности, степень упрочнения, физико-механические свойства поверхностного слоя металла, производительность обработки. Очевидно, что при выборе режимов упрочнения необходимо учитывать все факторы, при этом стремиться к оптимальным значениям. Неправильно выбранный режим упрочнения наплавленного металла значительно снижает производительность процесса и ухудшает эксплуатационные качества деталей.

Глубина наклёпанного слоя металла, являясь основным параметром упрочнения накатыванием, зависит от параметров режима накатывания и свойств наплавленного металла, а подача и число проходов роликов не оказывают существенного влияния на глубину наклёпанного слоя [1, 2, 10]:

$$t = b \cdot \left[\frac{4}{5 \cdot (b/a)^{3/2} + 3} \cdot \left(\frac{P}{a \cdot b \cdot \sigma_{\text{т}}} - \frac{17}{6 + \ln(b/a)} \right) \right]^{\frac{5}{10 + \ln(b/a)}},\ \text{мм}.$$

где b – малая полуось пятна контакта ролика с наплавленным металлом, мм; a – большая полуось пятна контакта ролика с наплавленным металлом, мм; P – усилие накатки роликами наплавленного металла, Н; $\sigma_{\text{т}}$ – предел текучести наплавленного металла, МПа.

Полуоси пятна контакта ролика с наплавленным металлом определяются по формулам [1, 2]:

$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta h \cdot R_{\text{р}} \cdot (R_{\text{д}} + h)}{R_{\text{р}} + R_{\text{д}} + h}},\ \text{мм}; \qquad b = \sqrt{\Delta h \cdot \left(\frac{2{,}25 \cdot S_{\text{н}}^2 + H^2}{H} - \Delta h \right)} + \Delta h,\ \text{мм};$$

где Δh – изменение диаметра детали после накатки роликами, мм; $R_{\text{р}}$ – радиус накатного ролика, мм; $R_{\text{д}}$ – радиус детали, мм; h – толщина наплавленного слоя после деформации роликами, мм; H – толщина наплавленного слоя

до деформации роликами, мм.

Усилие упрочнения должно быть минимальным, при котором достигается требуемая точность размера и шероховатость поверхности. При этом следует учитывать, что слишком малое усилие не обеспечивает полного смятия гребешков исходного микропрофиля поверхности и получения требуемой толщины наклепанного слоя. В том случае, если усилие упрочнения превышает предел прочности металла, происходит разрушение кристаллов металла, деформация детали и повышенный износ инструмента. Усилие накатки определяется по формуле [1, 2, 10]:

$$P = \frac{0{,}385\sigma_{\text{т}} R_{\text{р}} \alpha}{f}\left\{\frac{h}{2}\left(\exp\frac{2fb}{h}-1\right)+\frac{2h\left(\frac{\alpha}{2}\right)\cos\frac{\alpha}{2}}{\cos^2\frac{\alpha}{4}}\left[\exp\frac{0{,}87fb\left(1+\cos\frac{\alpha}{2}\right)}{h\left(\frac{\alpha}{2}\right)}-1\right]\right\}, \text{ Н},$$

где α – угол деформации, рад; f – коэффициент трения при деформации наплавленного металла; $h(\alpha/2)$ – функция.

Угол деформации при упрочнении цилиндрических деталей определяется по формуле [10]:

$$\alpha = \sqrt{\Delta h \frac{2\cdot\left(R_{\text{д}}+h\right)}{R_{\text{р}}\left(R_{\text{р}}+R_{\text{д}}+h\right)}}, \text{ рад.}$$

На основании проведенных исследований [2, 5, 8] можно рекомендовать усилия накатки в диапазоне $P = 7...10$ кН. Окончательный выбор усилия накатки горячего наплавленного металла следует производить исходя из конкретных условий.

Наиболее простым и надежным методом определения оптимального усилия упрочнения является метод пробных проходов, при котором на участках (15...20 мм) специального образца проводится накатка роликами с постоянно возрастающим усилием до тех пор, пока размеры детали, шероховатость поверхности и глубина наклепанного слоя наплавленного металла не достигнут требуемых значений. Обычно число проходов не превышает 3...5.

Подача ролика может быть радиальной и осевой. Наилучшее качество поверхности достигается при накатке с радиальной подачей, однако на практике цилиндрические детали накатывают с осевой подачей роликов. При накатке с подачами роликов меньше оптимальных значений может происходить перенаклеп поверхности, так как увеличивается число циклов нагружения больше допустимого. При упрочнении двумя роликами рекомендуемый диапазон подач 0,2...0,6 мм/об. детали.

Число проходов ролика не оказывает существенного влияния на глубину наклепанного слоя. Поверхностная твердость существенно возрастает после двух проходов, при дальнейшем увеличении количества проходов она увеличивается незначительно. Повторные проходы несколько влияют на шероховатость поверхности в сторону её уменьшения и, как правило, производятся в зависимости от тех задач, которые ставятся при накатывании.

При упрочняюще-сглаживающих режимах накатывания первый проход роликов позволяет полностью деформировать гребешки от предыдущей поверхностной обработки, повторные проходы приводят к незначительному уменьшению шероховатости поверхности. При сглаживающих режимах повторный проход приводит к более заметному повышению класса чистоты поверхности (примерно на один класс) за счет дополнительного деформирования неровностей, полученных от предварительной обработки. Накатка роликом более чем в два-три раза допускается как исключение.

На режимы накатки роликами существенное влияние оказывают толщина и шаг наплавки, которые, в свою очередь, зависят от режима наплавки – величины тока, диаметра и скорости подачи электродной проволоки, напряжения, скорости наплавки.

Свойства наплавленного металла зависят от марки электродной проволоки и типа защитной среды при наплавке. На режимы накатки существенное влияние оказывает предел текучести наплавленного металла при температуре в зоне пластической деформации. Повышение температуры наплавленного металла оказывает существенное влияние на его механические характеристики. При этом наплавленный металл имеет различные химический состав и механические свойства. При повышенных температурах в этих наплавках изменяется пластичность металла. Предел текучести наплавленного металла зависит от его химического состава и температуры (рис. 7).

Рис. 7. График зависимости предела текучести наплавленного металла от температуры: 1 – пружинная проволока 2-го класса; 2 – проволока Св-08А; 3 – проволока Св-08Г2С; 4 – проволока Нп-30ХГСА; а – флюс АН-348А; б – флюс АН-348А + 2,5 % графита + 2 % феррохрома; в – флюс АНК-18; г – углекислый газ; д – флюс ОСЦ-45М; е – флюс АН-28; к – флюс АН-20

С учётом содержания в нём углерода, хрома и марганца можно определить предел текучести при различных температурах по формуле [7, 9]:

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{9{,}807\cdot\left(1{,}4+C+Mn+0{,}3\cdot Cr\right)}{100}\left(1400-T\right), \text{ МПа},$$

где *C, Mn, Cr* – соответственно содержание в наплавленном слое углерода, марганца и хрома, %; *T* – температура наплавленного металла, °С.

Скорость накатки особенно не влияет на качество металлопокрытия, поэтому для повышения производительности процесса рекомендуется выбирать максимально возможную скорость накатки.

С целью определения оптимального варианта режимов пластической деформации наплавленного металла были проведены теоретические расчёты. Очень хорошие результаты с точки зрения выбора оптимальных режимов упрочнения дает разработанная номограмма (рис. 8). Применение данной номограммы позволяет быстро определить режимы упрочнения металла, наплавленного при восстановлении изношенных или изготовлении новых цилиндрических деталей, с учетом вышеизложенных параметров наплавки и накатки. Ключ к номограмме приведён на рис. 9.

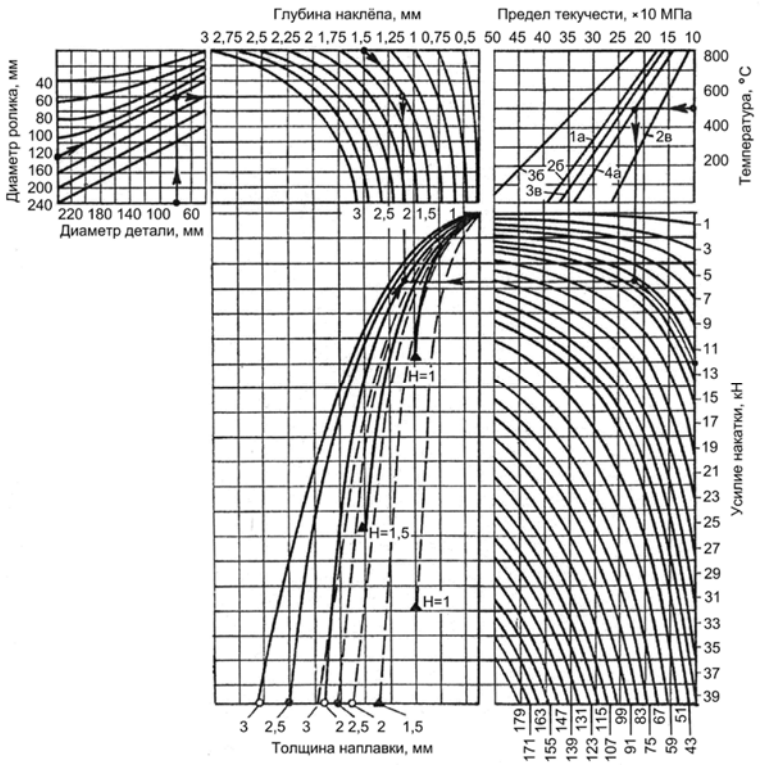


Рис. 8. Номограмма для определения режимов накатки роликами металла в процессе его наплавки на цилиндрическую деталь: 1 – пружинная проволока 2-го класса; 2 – Св-08А; 3 – Св-08Г2С; 4 – Нп-30ХГСА; а – флюс АН-348А; б – флюс ОСЦ-45М; в – газ CO_2; ____ шаг наплавки – 4 мм/об.; – – – шаг наплавки – 6 мм/об.

Задаваясь диаметром накатных роликов и усилием накатки, по номограмме (рис. 8) можно определить глубину наклепа. И наоборот, задаваясь усилием накатки и требуемой глубиной наклепа, можно определить необходимый диаметр роликов. Зная диаметр наплавляемой детали и толщину наплавки, можно подобрать марку наплавочной проволоки, защитную среду и необходимые режимы наплавки и накатки. Номограмма несложна, учитывает все параметры наплавки и накатки и исключает трудоемкие расчеты, что позволяет рекомендовать ее при определении режимов накатки наплавленного металла роликами.

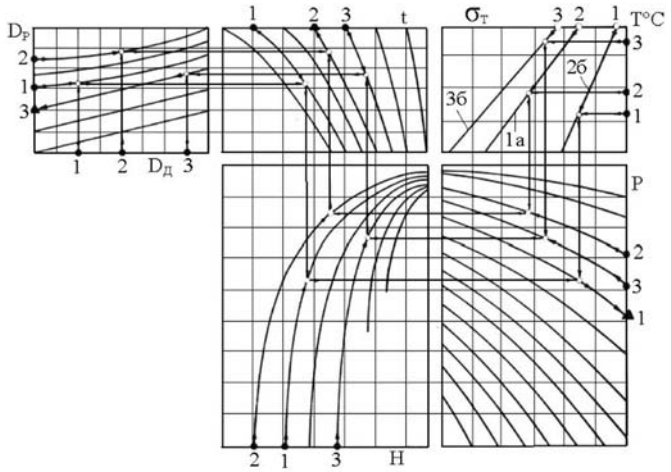


Рис. 9. Номограмма для определения режимов накатки роликами металла в процессе его наплавки на цилиндрическую деталь: 1 – усилие накатки (P); 2 – глубина наклёпа (t); 3 – диаметр ролика (D_P); 1а, 2б, 3б – марка сварочной проволоки и защитной среды

Пример. Исходные данные: диаметр наплавляемой детали – 80 мм; толщина наплавленногослоя – 2,5 мм; шаг наплавки – 4 мм/об; сварочная проволока – пружинная 2-го класса; флюс – АН-348А; температура металла в зоне деформации – 500 ºС. Необходимая глубина наклёпа – 2 мм.

По номограмме определяем, что для получения глубины наклёпа 2 мм необходимое усилие накатывания 11,5 кН при диаметре накатного ролика 200 мм, 17 кН при диаметре накатного ролика 160 мм и соответственно 22,5 кН при 120 мм.

Список литературы

1. Бойко Н.И. Зиновьев В.Е., Хачкинаян А.Е. Технические средства и методы повышения долговечности деталей транспортных машин: монография. Ростов н/Д: РГУПС, 2003. 238 с.

2. Бойко Н.И., Хачкинаян А.Е., Бойко Т.А. Исследование технологии повышения качества наплавленного металла деталей поверхностным пластическим деформированием: монография. Ростов н/Д: РГУПС, 2015. 193 с.

3. Бойко Н.И., Какуевицкий В.А., Песенко А.В. Упрочнение термомеханической обработкой коленчатых валов при восстановлении их наплавкой // Сварочное производство. 1973. № 4. С. 15–16.

4. Бойко Н.И. Ремонт деталей машин с термомеханической обработкой роликами // Механизация строительства. 1974. № 11. С. 16–18.

5. Бойко Н.И. Управление качеством наплавленного металла / Н.И. Бойко, А.Е. Хачкинаян // Вестник РГУПС. 2014. № 3 (55). С. 8–14.

6. Бойко, Н.И. Термомеханическое упрочнение наплавленного металла: монография. Ростов н/Д: РИИЖТ, 1986. 184 с.

7. Бойко Н.И. Повышение качества поверхности деталей машин ресурсосберегающими технологиями: учебник для вузов. Ростов н/Д: РГУПС, 1995. 254 с.

8. Бойко Н.И. Исследование технологических параметров процесса обкатывания роликами наплавленного металла / Н.И. Бойко, А.Е. Хачкинаян, Г.В. Санамян // Упрочняющие технологии и покрытия. М.: Машиностроение, 2006. № 10. С. 34–37.

9. Бойко Н.И. Ресурсосберегающие технологии повышения качества поверхностных слоёв деталей машин: учебное пособие для вузов на ж.д. транспорте. М.: Маршрут, 2006. 198 с.

10. Бойко Н.И., Хачкинаян А.Е., Бойко Т.А., Коробейников В.В. Исследование влияния упрочняющей обработки горячего наплавленного металла деталей на его трение и изнашивание: монография. Ростов н/Д: РГУПС, 2017. 178 с.

Хачкинаян Амбарцум Ервандович, канд. техн. наук, доцент, ambarzum21@yandex.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Ростовский государственный университет путей сообщения

RESEARCH OF THE QUALITY OF HARDENED WELD METAL

A.E. Khachkinayan

The influence of surfacing modes and rolling of deposited metal by rollers on the quality of the surface layer of the restored part is considered. Taking into account the theoretical calculations and practical results, a nomogram has been developed for choosing the optimal modes for rolling the deposited metal with rollers, which allows you to quickly determine the modes of hardening of the metal deposited during the restoration of worn cylindrical parts.

Key words: deposited metal, roller rolling, surfacing and rolling modes, nomogram, rolling force, work hardening depth, quality of metal coating.

Khachkinayan Ambarzum Ervandovich, candidate of technical sciences, docent, ambarzum21@yandex.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State Transport University

УДК 658.562.4
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-497-498

АУДИТ, КАК ИНСТРУМЕНТ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ

Е.Ю. Чуракова

Статья знакомит с понятием аудит и его применением в качестве инструмента контроля качества предприятия, актуальность внутреннего аудита заключается в том, что он способствует соблюдению требований законодательства, внутренних политик и процедур компании, что помогает предотвратить финансовые и другие риски. Он может помочь выявить проблемы в управлении, финансовых операциях, соответствии нормативно-правовым актам и других важных аспектах деятельности организации. Аудит играет важную роль в контроле и проверке соответствия требованиям СМК. Аудит направлен на обеспечение прозрачности в деятельности компании и выявление возможных проблем, ошибок или недостатков, которые могут повлиять на достижение целей организации. Рост требований к работникам, занятым проведением аудитов, и поддержание их квалификации являются важными факторами для эффективного аудиторского процесса и достижения целей организации, что обосновано растущим осознанием важности аудита в обеспечении качества и эффективности управления. Освещен вопрос об источнике привлечения аудиторов на предприятие.

Ключевые слова: система менеджмента качества, аудит, внешний аудит, внутренний аудит, аудитор.

Деятельность любого предприятия в условиях конкуренции направлена на достижение определенного положения на рынке и превосходства над конкурентами. В этом предприятиям помогает внедрение (или уже внедренная) система менеджмента качества. Внедрение эффективно функционирующего внутреннего аудита в компаниях, включая российские, является важным и актуальным процессом. Внутренний аудит помогает организации раннее выявлять и предотвращать риски, что способствует повышению эффективности и устойчивости бизнеса. Основные преимущества внутреннего аудита заключаются в том, что он проводится независимыми сотрудниками компании/предприятия, специализирующимися на аудите и контроле, что позволяет обнаружить проблемы и недостатки внутренних процессов более оперативно. Более того, внутренний аудит обычно является более экономически эффективным, поскольку не требует затрат на привлечение внешних аудиторов. Внутренний аудит также способствует соблюдению требований законодательства, внутренних политик и процедур компании, что помогает предотвратить финансовые и другие риски. Он может помочь выявить проблемы в управлении, финансовых операциях, соответствии нормативно-правовым актам и других важных аспектах деятельности компании. Таким образом, внедрение эффективно функционирующего внутреннего аудита является неотъемлемой частью стратегии управления рисками и повышения прозрачности в компаниях, особенно в российских условиях. Это позволяет принимать своевременные меры по устранению проблем и обеспечивает надежную основу для устойчивого развития организации [1,2].

Система менеджмента качества (СМК) — это комплекс управленческих механизмов и приемов, внутренних политик, методик для работы предприятия, целью которых является удовлетворение покупателей товарами и услугами высоко качества на постоянной основе [3].

Система менеджмента качества, такая как ISO 9001, дает организации набор инструментов и методики для обеспечения стабильного качества выпускаемой продукции и услуг, удовлетворения потребностей клиентов и достижения конкурентного преимущества. Стандарт системы менеджмента качества ISO 9001 поддерживается Международной организацией по стандартизации и согласовывается большинством стран-членов этой организации, с тем чтобы он мог быть признан на международном уровне, а также принят в качестве золотого стандарта для процессов, используемых во всем мире для СМК [4].

Повышение нестабильности внешней среды выдвигает дополнительные требования к системе управления предприятием в области качества и его контроля и как раз аудит в этом контексте играет важную роль в контроле и проверке соответствия требованиям СМК.

Аудит системы менеджмента качества может быть внешним или внутренним.

а) *внешний аудит* – проводится аудиторской фирмой (аудитором) на договорной основе с экономическим субъектом;

б) *внутренний аудит* проводится штатными аудиторами, работниками предприятия, которые подчиняются руководителю [5, с. 11].

Изначально внутренний аудит существовал исключительно в рамках анализа бухгалтерской отчетности и контроля деятельности предприятия. Современное развитие экономики и рост компаний привели к трансформации основных функций внутреннего аудита, в результате чего он превратился в совершенно новый эффективный финансовый инструмент с широким спектром задач [6], таких как предугадать финансовые риски, повысить эффективность менеджмента.

Целью любого аудита вне зависимости от его статуса (внутренний или внешний) является контроль за исполнением принятых управленческих решений, а также выявления наличия или отсутствия рисков неэффективного управления организацией [7]. Аудит направлен на обеспечение непрерывности и стабильности компании, а также на выявление возможных проблем, ошибок или недостатков, которые могут повлиять на достижение целей. Наблюдая за мировым сообществом, можно увидеть, что требования к работникам, занятым проведением аудитов, становятся более высокими. Специалисты, которые занимаются проведением аудитов, должны обладать актуальными знаниями, навыками и квалификацией это важно для поддержания высокого профессионализма всей компании в целом и обеспечения качественного проведения аудиторской проверки, в частности. [7].

При этом, вопрос об источнике привлечения аудиторов на предприятие может быть решен двумя путями. Первый - подготовка и привлечение собственных аудиторов. Второй - привлечение внешних профессиональных аудиторов. Оба варианта имеют свои преимущества и недостатки (таблица 1 и 2).

В итоге, выбор между привлечением собственных аудиторов или внешних профессионалов зависит от конкретных потребностей и целей предприятия, доступных ресурсов и предпочтений компании.

Если мы рассматриваем подготовку кадров для внутренних аудитов, то организации необходимо руководствоваться требованиями стандарта ISO 19011:2018 [8], в котором установлены требования к личным качествам, знаниям и навыкам аудиторов.

В соответствии со стандартом аудиторы должны обладать общими знаниями и навыками аудиторов систем менеджмента, такими как знание процедуры, инструменты и методы проведения аудита, реализация концепции стандартов ISO серии 9000; обладать навыками планирования и эффективного использования ресурсов, предупреждения и разрешения конфликтов.

Таблица 1

Положительные и отрицательные стороны внешних аудитов

Преимущества внешнего аудита	Недостатки внешнего аудита
Уровень объективности	Незнание традиций предприятия
Эффективность работы	Предубежденность к «чужим»
Воздействие критика	Незнание неформальных лидеров
Квалификация аудиторов	Дефицит времени
Использование результатов в рекламных целях	Выборочность проверки
Демонстрирование результатов перед второй стороной	

Таблица 2

Положительные и отрицательные стороны внутренних аудитов

Преимущества внутреннего аудита	Недостатки внутреннего аудита
Лучшее знание аудиторами организации	Высокая степень субъективности при проверке
Меньшие затраты, чем на внешний аудит	Выявление недостатков воспринимаются более болезненно
Более глубокий объем аудита	Меньшее внимание к результатам со стороны руководства
Отсутствие негативного отношения со стороны проверяемых	Менее высокая интенсивность самой проверки (из-за менее жестких временных рамок)
Аудиторы одновременно являются экспертами	

Так же согласно рекомендациям, изложенным в ISO 19011, аудитор может получить надлежащую компетентность, используя комбинацию следующего:

успешное завершение учебных программ, которые охватывают общие знания и навыки аудитора;

опыт работы на соответствующих технических, управленческих или профессиональных должностях;

образование/обучение и опыт в конкретной системе менеджмента и отрасли, которые расширяют общую компетентность;

опыт аудита, полученный под руководством аудитора, компетентного в этой области [9].

Но руководитель группы по аудиту должен обладать дополнительным опытом аудита для расширения компетентности. Этот дополнительный опыт должен быть приобретен при работе под руководством другого руководителя группы по аудиту.

В стандарте приведены методы оценки аудиторов, среди которых: анализ записей, тестирование, интервью, наблюдение, обратная связь и анализ после аудита. Таким образом, ISO 19011 устанавливает дифференцированный подход к определению требований к компетентности членов группы по аудиту, а также методы получения и оценки этой компетентности. [10].

Анализируя данные требования к компетенциям аудитора, руководитель компании/предприятия принимает решение об источнике привлечения аудиторов на предприятие исходя из размеров предприятия и финансовых возможностей, а так же рациональности и возможности подготовки собственных аудиторов.

Таким образом, применение внутреннего аудита с привлечением собственных аудиторов и/или подготовки собственных кадров является эффективным средством контроля и финансовым инструментом для повышения эффективности компании. Внутренний аудит — это удобный и эффективный инструмент контроля, который позволяет предприятию осуществлять следить над своими процессами и системами управления, выявлять проблемы и искать пути их решения, а также повышать результативность и эффективность управленческих решений, что и позволяет занять определенное положение на рынке и превосходства над конкурентами, к которому стремиться любой руководитель.

Список литературы

1. Пасынков С.А. Внутренний аудит затрат как элемент общего аудита // Нацразвитие. Наука и образование. 2021. №3 (3). С. 7-9.

2. Первова К.А. Актуальность внутреннего аудита в современных условиях // Аудит и финансовый анализ. 2019. № 5. С. 104-108.

3. Токарев В.В. Оценка поставщиков для совершенствования управления цепочками поставок на примере атомной промышленности: дис…. кан. тех. наук: 05.02.23. М.: 2020. 211 с.

4. Ярыгина И.В., Головина М.Г., Шишаева Н.В. СМК, как показатель обеспечивающий устойчивый выпуск конкурентоспособной продукции//Техника и технологии: пути инновационного развития. 2022. С.307-310.

5. Мирошниченко Т.А. Аудит: учебное пособие. Ч. 1. Основы аудита / Т.А. Мирошниченко; Донской ГАУ. Новочеркасск: Колорит, 2018. 163 с.

6. Щербакова Е.П. Комплексный подход к вопросу оптимизации процессов регламентации и стандартизации внутреннего аудита в российских коммерческих организациях // Менеджмент сегодня. 2018. № 2. С. 74-87.

7. Панков Д.А., Каткова М.К. Понятие и сущность управленческого аудита, его отличие от внешнего аудита // Бухгалтерский учет, анализ и аудит: история, современность, перспективы. Сборник научных статей. Минск: 2015. С. 220-225.

8. ISO 10011-3:1991, Guidelines for auditing quality systems. Part 3. Management of audit programmes, 1991.

9. ГОСТ Р ИСО 19011-2021. Оценка соответствия. Руководящие указания по проведению аудита систем менеджмента. Официальное издание. М.: ФГБУ "РСТ", 2022.
10. Токарев В.В., Денискина А.Р. Моделирование и автоматизация процессов оценки зрелости поставщиков на основе лучших мировых практик // Труды МАИ. 2019. № 107. С. 15.

Чуракова Екатерина Юрьевна, старший преподаватель, churakova-ekaterina1@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

AUDIT AS AN ENTERPRISE QUALITY CONTROL TOOL

E.Y. Churakova

The article introduces the concept of audit and its application as a tool for quality control of an enterprise, the relevance of internal audit lies in the fact that it promotes compliance with the requirements of legislation, internal policies and procedures of the company, which helps to prevent financial and other risks. It can help identify problems in management, financial transactions, compliance with regulations and other important aspects of the organization's activities. Audit plays an important role in monitoring and verifying compliance with QMS requirements. The audit is aimed at ensuring transparency in the company's activities and identifying possible problems, errors or shortcomings that may affect the achievement of the organization's goals. The increasing demands on employees engaged in conducting audits and maintaining their qualifications are important factors for an effective audit process and achieving the goals of the organization, which is justified by the growing awareness of the importance of auditing in ensuring quality and management effectiveness. The issue of the source of attracting auditors to the enterprise has been clarified.

Key words: quality management system, audit, external audit, internal audit, auditor.

Churakova Ekaterina Yurievna, senior lecturer, churakova-ekaterina1@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI)

УДК 658.5.011
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-499-500

К ВОПРОСУ ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ОБЩЕГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

А.Е. Бром, Б.А. Швайко

В статье рассматривается актуальная проблема качества машиностроительной продукции на российских предприятиях как национальном, так и мировом уровнях. Выделены основные виды контроля качества, включая входной, внутренний и выходной контроль. Особое внимание уделяется отсутствию разработанных систем внутреннего контроля на предприятиях общего машиностроения, что становится особенно заметным при наличии большой номенклатуры комплектующих изделий. Помимо этого, авторами выделяются несколько основных проблем – где делать точки внутреннего оперативного контроля и как его осуществлять. Предлагается организовывать точки оперативного контроля в соответствии с уровнями конфигурации.

Ключевые слова: машиностроительная продукция, контроль качества, управление конфигурацией, оперативный контроль качества.

Проблема качества машиностроительной продукции на российских предприятиях остается актуальной и важной как в национальном, так и в мировом контексте. Качество выпускаемой продукции является ключевым фактором конкурентоспособности на рынке по множеству причин. Во-первых, современные требования к качеству продукции постоянно растут. С развитием технологий и появлением новых материалов появляются новые стандарты и ожидания потребителей. Российским машиностроительным предприятиям необходимо постоянно обновлять свои процессы и оборудование, чтобы соответствовать этим требованиям. Во-вторых, некачественная продукция может привести к экономическим потерям как для предприятий, так и для потребителей. Ремонт и замена дефектных изделий, а также потери из-за простоев в производстве могут быть значительными. Помимо этого, стоит отметить, что в машиностроении безопасность и надежность продукции играют критическую роль, особенно в отраслях, связанных с транспортом, энергетикой и обороной. Некачественные изделия могут привести к серьезным авариям и чрезвычайным ситуациям.

Технологический процесс изготовления изделия в машиностроении может быть сложным и многоэтапным. Важно понимать, что конкретные этапы и методы могут различаться в зависимости от типа изделия, материалов, используемых в производстве, и особенностей производственного предприятия [4]. Ниже представлен общий обзор технологического процесса изготовления машиностроительного изделия:

1. Проектирование и разработка. На данном этапе основными процессами следует считать определение требований и спецификаций для машиностроительного изделия, создание чертежей и технической документации, включая 3D-модели, а также разработку концепции производства и выбор различных технологических решений.

2. Закупка материалов и компонентов. Этот этап характеризуется заказом и закупкой сырья, металлов, электронных компонентов и других материалов, необходимых для производства продукции.

3. Подготовка производства – это планирование производственных процессов и ресурсов, а также подготовка производственных помещений и оборудования.

4. Обработка материалов – резка, формирование и обработка металлических деталей и компонентов с помощью станков, сверлильных и фрезерных машин, лазеров и т.д.

5. Сборка и монтаж. Этот этап состоит из сборки компонентов и деталей в конечное машиностроительное изделие

6. Упаковка и доставка. Данный этап подразумевает организацию доставки до конечного потребителя.

7. Обслуживание и гарантийное обслуживание - предоставление гарантийного обслуживания и сервисной поддержки машиностроительных изделий после их продажи.

Важной частью производственного процесса, является управление качеством продукции, которое напрямую направлено на выявление дефектов или брака в готовой продукции, а также на проверку качества продукции в процессе его изготовления.

В машиностроении выделяют несколько основных видов контроля качества продукции, наиболее сильно влияющих на конечный уровень качества выпускаемой продукции:

1. Входной контроля качества — это проверка качества сырья и вспомогательных материалов, поступающих в производство;

2. Внутренний контроля качества — это набор процедур, проведение которых осуществляется на всех этапах производства: от момента получения сырья и комплектующих материалов до поступления готовой продукции на склад.;

3. Выходной контроля качества — данная процедура является завершающим этапом технологического процесса производства продукции.

На предприятиях оборонно-промышленного комплекса (ОПК) данные виды контроля строго регламентированы. При входном контроле, при получении узлов либо деталей от поставщиков все детали и узлы проверяются. Кроме того, на предприятиях ОПК выстроена система внутреннего контроля качества. Внутренний контроль вводится на этапе сборки деталей в узел, либо узлов в агрегат. Помимо этого, осуществляется также выходной контроль готового изделия, что позволяет минимизировать уровень брака. Важно отметить, что контроль производят не выборочно, а производят проверку всех компонентов.

В отличие от предприятий ОПК, на предприятиях общего машиностроения зачастую нет разработанной системы внутреннего контроля. Особенно остро это проявляется, когда номенклатура комплектующих изделий значительна. Стоит отметить, что изготовление машиностроительных изделий на предприятии часто включает в себя использование как покупных комплектующих изделий (ПКИ), так и элементов, произведенных на самом предприятии. Исходя из вышесказанного, зачастую выходного контроля качества уже готового изделия бывает недостаточно. Необходимо решить – в каких точках технологического процесса необходимо организовать «точки оперативного контроля» для повышения выходного уровня качества выпускаемой продукции. Под контролем качества понимается проверка соответствия количественных или качественных характеристик свойств продукции или процесса, от которого зависит качество продукции, установленным техническим требованиям.

Управление конфигурацией – один из основных инструментов управления жизненным циклом продукта (ЖЦП), который направлен на установление и поддержание соответствия различных характеристик и свойств готового изделия (эксплуатационных, функциональных, физических) требованиям заказчика [1]. Управление конфигурацией позволяет проводить функциональный анализ, выделяя некоторые функции конечного изделия, и соотносить их с конкретными блоками – объектами конфигурации (ОК). Физическая конфигурация – это структура конечного изделия, изготовленного согласно конструкторской документации, состоящая из объектов конфигурации – конкретных блоков.

На рисунке 1 показан функциональный анализ системы шасси вертолета Ми-28Н. Это опытно-экспериментальная конфигурация вертолета Ми-28, предназначенного для применения в дневных и ограниченно-сложных погодных условиях. Система шасси на данной модели вертолета выполнена неубирающейся, это обусловлено прежде всего необходимостью принимать на себя нагрузку в случае аварийной посадки, а также позволяет значительно снизить массу вертолета за счет оптимизации и исключения из конструкции механизмов складывания шасси [2]. Система шасси оснащена основными стойками, которые сконструированы таким образом, чтобы поглощать энергию при жесткой посадке вертолета. Основные стойки шасси оснащены тормозными колесами размером 720х320 мм. Колея шасси – 2,29 м, база – 11,0 м. Задняя опора укомплектована колесом размером 480х200 мм. В конструкцию опор шасси включены гидропневматические амортизаторы с дополнительным (аварийным) ходом. На рисунке 1 представлен функциональный анализ системы шасси вертолета Ми-28Н.

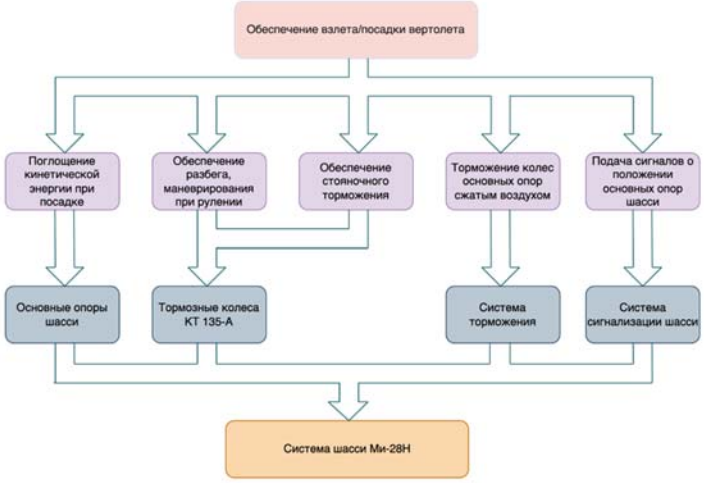


Рис. 1. Функциональный анализ системы шасси вертолета Ми-28Н

Функциональный анализ позволяет понять, какие функции выполняет система шасси вертолета Ми-28Н и какие элементы системы позволяют успешно выполнять выполнение данных функций. В первую очередь, система шасси решает основную задачу - успешный взлет и посадку вертолета. Помимо этого, второстепенные функции, а именно: поглощение кинетической энергии при взлете и посадке, обеспечение разбега, маневрирование по земле при рулении, обеспечение торможения, удержание тормоза при стоянке выполняются различными элементами системы шасси и их взаимосвязь показана на рисунке.

Для соответствия технико-экономическим требованиям заказчика помимо функционального анализа необходимо создать также конфигурацию конечного изделия с внедрением на каждом уровне оперативного контроля качества. Оперативный контроль качества по каждому объекту конфигурации на всех уровнях УК обеспечат контроль функциональных и структурных характеристик надежности изделия и позволит не только проводить документацию изменений, но и контролировать внесенные изменения в параметры изделия для возможных улучшений его технических характеристик. На рисунке 2 представлена конфигурация части готового изделия – система шасси вертолета Ми 28Н.

Рис. 2. Функциональная конфигурация системы шасси вертолета Ми-28Н

Декомпозиция изделия на несколько уровней конфигурации, определение объектов конфигурации и выявление среди них покупных объектов конфигурации и объектов, которые разрабатываются полностью самостоятельно силами предприятия позволяет точечно внедрять инструменты оперативного контроля качества для данных объектов. Это обеспечит баланс между заданным уровнем качества и соблюдением технико-экономических требований заказчика.

В зависимости от формы, размеров, повторяемости элементов и характера производства сборочные операции могут происходить или в один прием, или раздельно, сначала с использованием узловой сборки, а затем сборка из готовых узлов всего изделия [3]. На рисунке 2 представлена функциональная конфигурация агрегата «Система шасси Ми-28Н», который состоит из 4 основных узлов. Более подробно рассмотрен узел «Система торможения». Он состоит из трех основных элементов - редукционного клапана УП25/2 (А), пневматического агрегата управления УПОЗ/2М (Б) и сигнализатора давления МСТ-25А (В). Элемент А – покупное комплектующее изделие (ПКИ), поставляется ООО «ЭЛЕМЕНТАВИА». Компания «ЭЛЕМЕНТАВИА» осуществляет поставку воздушных судов, авиационно-технического имущества, поставку металлопроката, материально-техническое снабжение предприятий ВПК и авиационной промышленности. Элемент Б – Пневматический агрегат управления УПОЗ/2М – элемент собственного производства. Элемент В – покупное комплектующее изделие. Производитель – Энгельсское приборостроительное объединение «Сигнал» – один из ведущих российских разработчиков и серийных производителей приборов измерения давлений для авиационной и ракетно-космической техники. Так как узел «Система торможения» состоит из изделий и собственного производства и ПКИ, только выходного контроля качества для данного узла недостаточно. На данном уровне вводится уровень ОК1. Это уровень, на котором для каждого из элементов собственного производства необходимо предусмотреть оперативный контроль качества до подсборки узла. Для ПКИ должен быть предусмотрен входной контроль качества на этапе закупки элемента.

Исходя из всего вышеизложенного, возникает несколько вопросов: 1) где делать точки внутреннего оперативного контроля качества продукции; 2) Каким образом осуществлять оперативный контроль качества.

В качестве предложения авторами рассматривается возможность организовать точки оперативного контроля в соответствии с уровнем конфигурации в горизонтальном направлении. Если следовать по уровням конфигурации и добавлять точки оперативного контроля на определенном уровне конфигурации, это даст возможность проводить процедуры оперативного контроля качества всех узлов и деталей сборного изделия как на данном уровне, так и при сборке элементов в единый узел.

Оперативный контроль можно организовать исходя из гипотезы о рисках. Оперативный контроль качества продукции, внедренный в процессы и процедуры компании, позволяет определить, соответствует ли изделие заданным требованиям. Результатом контроля является решение о приемке или браковке изделия в зависимости от его соответствия требованиям. В математической статистике контроль надежности рассматривается как задача проверки гипотез о значениях показателя надежности. Рассмотрим ситуацию, когда показатель надежности R возрастает с уровнем надежности, к примеру T или $P_{(t)}$. Если в технической документации значение $R_{(\text{тр})}$, характеризующее показатель требуемой надежности, задано, то при разработке контрольной процедуры будут отталкиваться от показателя приемки изделия $R > R_{\text{тр}}$ и $R < R_{\text{тр}}$ для браковки изделия.

Если ввести оперативную характеристику, отражающую вероятность приемки партии продукции в зависимости от входного уровня качества, то ее зависимость можно увидеть на рисунке 1. При этом, идеальная характеристика также отражена на рисунке 1 и показана жирной линией. На практике идеальная характеристика является недостижимой, так как для ее достижения необходимо соблюдение множества факторов, в том числе большого времени наблюдения, анализа большого количества партий и так далее.

Помимо этого, при оперативном контроле качества партии продукции необходимо вводить два уровня показателя надежности [5]: приемочный R_0 и браковочный R_1. Граничными условиями для этих уровней следует считать, что изделия с уровнем надежности $R > R_0$ (1) гарантированно отвечают всем требованиям качества для заказчика и должны приниматься ими. Соответственно, изделия с уровнем надежности $R < R_1$ (2) необходимо считать не соответствующими требованиям по качеству для заказчика и должны браковаться с вероятностью не ниже $1 - L(R_1)$ (3).

Коэффициенты α – риск производителя, и β – риск заказчика, являются вероятностями противоположных событий и характеризуют уверенность контроллеров в правильности принимаемых ими решений. Рассчитываются как $\alpha = 1 - L(R_0)$ (4) и $\beta = L(R_1)$ (5). При соответствии фактического уровня качества заданным граничным условиям, вероятность ошибочного решения при приёмке единицы товара будет отсутствовать, при браковке будет равна коэффициенту α. При несоответствии фактического уровня качества вероятность ошибочного решения при приёмке единицы товара будет равна коэффициенту β, при браковке единицы продукции такая вероятность будет отсутствовать.

Исходя из всего вышеизложенного, проверка гипотезы $R > R_{\text{тр}}$ (6) и $R < R_{\text{тр}}$ (7) заменяется проверкой гипотезы $R > R_0$ (8) и $R < R_1$ (9).

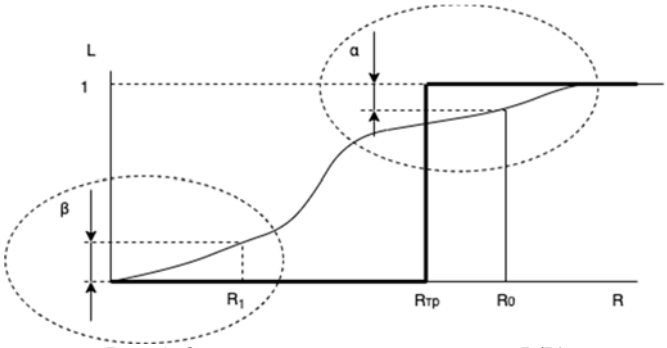


Рис. 4. Оперативная характеристика L(R)

Как указывалось ранее, цель контроля (контрольной процедуры) — установить, соответствует ли изделие заданным требованиям. Результатом контроля является решение о соответствии или несоответствии изделия требованиям – приемкой либо браковкой изделия.

Список литературы

1. Смирнов А.В., Бром А.Е. Моделирование оценки и выбора качества обработки машиностроительной продукции. / Глобализация экономики и российские производственные предприятия / Материалы 20-й Национальной научно-практической конференции. Новочеркасск, 2022. С. 13-16.
2. Вертолет Ми-28Н: инструкция по технической эксплуатации. 242с.
3. Бром А.Е., Омельченко И.Н., Терентьева З.С. Организация и управление жизненным циклом наукоемкой продукции. Курс лекций. Учебное пособие. Москва, 2021.
4. Бром А.Е., Смирнов А.В. Моделирование выпуска продукции в условиях выполнения требований качества обработки и минимизации производственных затрат. / Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 5 (131). С. 148-152.
5. Дзиркал Э.В. Надежность сложных систем. / Курс лекций (опорный конспект)

Бром Алла Ефимовна, д-р техн. наук, профессор, bauman@bmstu.ru, Россия, Москва, Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана,

Швайко Борис Александрович, аспирант, Россия, Москва, Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана

ON THE ISSUE OF ORGANIZING OPERATIONAL QUALITY CONTROL OF GENERAL ENGINEERING PRODUCTS.

A.E. Brom, B,A. Shvayko

The article addresses the pressing issue of the quality of machinery production in Russian enterprises at both national and global levels. It identifies key quality control types, including incoming, internal, and outgoing inspection. Special attention is given to the absence of established internal control systems in general engineering enterprises, particularly noticeable when dealing with a diverse range of component items. Additionally, the authors highlight several key challenges concerning the establishment and execution of internal operational control points, proposing their organization based on configuration levels.

Key words: machinery production, quality control, configuration management, operational quality control.

Brom Alla Efimovna, doctor of technical sciences, professor, bauman@bmstu.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University,

Shvayko Boris Alexandrovich, postgraduate, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University

УДК 621.77, 621.7.043
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-503-504

КАЧЕСТВО МЕТАЛЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

О.И. Борискин, С.Н. Ларин, М.Г. Нуждин

Обсуждены вопросы повреждаемости материала заготовок при обработке давлением. Рассмотрены возникающие дефекты поверхности в соответствии с требованиями новых ГОСТ 21014—2022, ГОСТ 7566—2018 и ГОСТ Р 52745—2021. Показана их согласованность в сферах проверки и контроля качества металлопродукции.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, холодное деформирование, повреждаемость, дефект поверхности.

При использовании выдавливания как одного из высокоэффективных способов получения полых деталей с переменной толщиной стенки один из основных параметров для оценки качества получаемых заготовок — повреждаемость материала заготовки. Моделирование процессов с применением CAE-систем показало влияние геометрических характеристик процесса на повреждаемость материала заготовки [1—4]. Прокатка, ковка и другие высокотехнологичные процессы обработки металлов давлением, особенно — совмещающие технологические операции, нередко сопровождаются дефектами поверхности. При этом дефекты поверхности могут иметь схожий внешний вид, например, полосы-линии скольжения или полосы нагартовки, сетка отпечатков и пр. [5]. Эти дефекты поверхности обусловлены процессами деформации (табл.1).

01.09.2022 приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31.03.2022 г. № 182-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 21014—2022 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации [5]. Этот стандарт устанавливает термины и определения дефектов поверхности основных видов металлопродукции из стали и сплавов, формоизменение которых заканчивается в металлургическом производстве, например, плоского проката (листов, полос, лент, рулонов), сортового, фасонного проката и кованой металлопродукции.

В связи с реализацией Государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», обеспечивающей интенсивное развитие обрабатывающей промышленности, за последние годы сильно актуализированы требования к качеству, приемке и испытаниям проката [6-9]. Это влечет за собой разработку высокоэффективных технологических процессов в течение всего жизненного цикла продукции. К ним относят перспективные процессы, совмещающие несколько операций обработки металлов давлением по ГОСТ 18970—84 [10, 11]. Установлена практическая результативность совмещения технологических операций вытяжки и отбортовки листовых заготовок, в том числе имеющих центральное отверстие [11].

Но высокотехнологичные процессы обработки металлов давлением, совмещающие технологические операции, накладывают повышенные требования к контролю качества, приемки и испытаний листовых заготовок.

Согласно ГОСТ 7566—2018 проверку качества и приемку партии металлопродукции проводит изготовитель, при этом партию считают соответствующей установленным требованиям, если масса участков с несоответствующим качеством поверхности не превышает 2 % массы партии, если иное не оговорено в нормативных документах.

В Методике определения масс участков дефектов поверхности для металлопродукции в рулонах регламентирована периодичность появления дефектов (расстояние между одинаковыми «элементами» повторяющихся дефектов) более чем через 3 м или менее чем через 3 м. Указанная периодичность появления дефектов обусловлена возможностью использования проката после вырезки участков с дефектами поверхности [8].

При получении неудовлетворительных результатов испытаний партия металлопродукции по решению изготовителя может быть подвергнута повторным испытаниям в соответствии с п.4.2 ГОСТ 7566—2018 или доработке с последующим предъявлением на повторную приемку.

Регламентирована возможность проведения повторных испытаний по двум схемам (выбор схемы определяется заказчиком):

- схема 1 — на пробах, образцах, отобранных от удвоенного количества единиц металлопродукции в партии, не проходивших первичные испытания;
- схема 2 — на пробах, образцах, отобранных от удвоенного количества единиц металлопродукции в партии, не проходивших первичные испытания, а также на удвоенном количестве проб, образцов, отобранных от единиц металлопродукции, не выдержавших первичные испытания.

Для высокотехнологичных процессов обработки металлов давлением, совмещающих технологические операции, целесообразно проводить повторные испытания согласно схеме 2. Тогда при получении удовлетворительных результатов повторных испытаний все единицы металлопродукции, входящие в партию, считают соответствующими установленным требованиям, за исключением единиц металлопродукции, не выдержавших первичные испытания.

При оценке качества авиационных материалов / полуфабрикатов и анализа данных контроля макро- и микроструктуры определяют относительное количество несоответствующей продукции (процент брака). При наличии отклонений от установленных норм, превышающих 15% от предъявленного объема, производство не может быть сертифицировано, а при инспекционном контроле действие сертификата на данный вид материала/полуфабриката прекращается [12].

Дефекты поверхности металлопродукции, обусловленные процессом деформации

Номер термина в ГОСТ 21014—2022	Наименование дефекта	Определение дефекта	Примечание
3.3.13	Полосы-линии скольжения	Дефекты поверхности в виде темных полосок и разветвленных линий на поверхности холоднокатаных листов, лент и рулонов, образовавшихся вследствие местных напряжений, превышающих предел текучести металла, вызванных нарушением технологии обработки давлением	Дефекты обычно расположены под углом 45° к направлению прокатки и дрессировки
3.3.14	Полосы нагартовки	Дефект поверхности в виде чередования параллельных светлых полос, расположенных поперек направления прокатки, образовавшихся при повышенной неравномерной деформации, обусловленной автоколебаниями валков	Дефект может быть представлен в виде чередования толстых и тонких полос матового дрессированного металла и блестящего недрессированного металла, образовавшихся от неравномерной деформации, обусловленной вибрацией рабочих клетей стана холодной прокатки или дрессировочного стана при работе на высоких скоростях, неоптимальными режимами прокатки
3.3.28	Сетка отпечатков	Дефект поверхности в виде периодически повторяющихся, имеющих форму сетки выступов, образующихся от вдавливания прокатываемого плоского проката в трещины изношенных валков	Дефект обычно встречается на одной стороне проката

Качество поверхности в обработке металлов давлением является одним из важнейших вопросов обеспечения качества, что подтверждается пересмотром, актуализацией и введением в действие соответствующих документов по стандартизации в 2017-2023 годах.

Список литературы

1 Ларин С.Н. Оценка влияния геометрических характеристик обратного выдавливания трубных заготовок на качество изделий // В сборнике: Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении; III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Тула, 2022. С. 123-125.

2 Ларин С.Н., Платонов В.И., Ларина М.В. Оценка напряженных и деформационных параметров заготовки при обратном выдавливании стальных труб // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 111-116.

3 Ларин С.Н., Платонов В.И., Матченко Н.М., Нуждин Г.А. Оценка напряженного состояния и повреждаемости стальных труб при обратном выдавливании // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 5. С. 295-301.

4 Ларин С.Н., Ларина М.В., Трегубов В.И. Оценка влияния геометрических характеристик обратного выдавливания трубных заготовок на повреждамость материала изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 350-354.

5 ГОСТ 21014—2022. Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения. Москва: ФГБУ «РСТ», 2022. 102 с.

6 ГОСТ 10702—2016. Прокат сортовой из конструкционной нелегированной и легированной стали для холодной объемной штамповки. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2017. 28 с.

7 ГОСТ Р 58972—2020. Оценка соответствия. Общие правила отбора образцов для испытаний продукции при подтверждении соответствия. Москва: Стандартинформ, 2020. 16 с.

8 ГОСТ 7566—2018. Металлопродукция. Правила приемки, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение. Москва: Стандартинформ, 2019. 31 с.

9 ГОСТ Р 52745—2021. Комплексная система контроля качества. Оценка соответствия материалов, полуфабрикатов и иной продукции, используемых при изготовлении изделий авиационной и иной техники гражданского, оборонного и двойного применения, на предприятиях-поставщиках. Общие требования. Москва: ФГБУ «РСТ», 2021. 22 с.

10 Луканова Е.О., Евсюков С.А., Артюховская Т.Ю. Методика проектирования технологического процесса изготовления деталей совмещением операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки // Заготовительные производства в машиностроении. 2022. Т. 20, №12. С. 545-549.

11 Трегубов В.И., Ларин С.Н., Пасынков А.А., Нуждин Г.А. Оценка влияния геометрии инструмента на силовые параметры совмещенного процесса вытяжки и отбортовки // Заготовительные производства в машиностроении. 2019. Том 17, №4. С. 165-167.

12 Руководство Р СЦМ-04-2017. Оценка качества материалов/ полуфабрикатов при сертификации их производства. Выпуск 6. Москва: СЦ «МАТЕРИАЛ», 2017. 31с.

Борискин Олег Игоревич, д-р техн. наук, профессор, директор ПТИ, заведующий кафедрой, polyteh2010@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, доцент, заместитель директора ПТИ, заведующий кафедрой, larin_1@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нуждин Михаил Георгиевич, магистрант, mishanuzhdin1@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METAL QUALITY DURING PRESSURE TREATMENT

O.I. Boriskin, S.N. Larin, M.G. Nuzhdin

The issues of damage to the workpiece material during pressure treatment were discussed. Surface defects arising in accordance with the requirements of the new GOST 21014-2022, GOST 7566-2018 and GOST R 52745-2021 were considered. Their consistency in the issues of inspection and quality control of metal products were shown.

Key words: metal pressure treatment, cold deformation, damage, surface defects.

Boriskin Oleg Igorevich, doctor of technical sciences, professor, director of polytechnical institute, head of chair, polyteh2010@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, docent, deputy director of polytechnical institute, head of chair, larin_1@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nuzhdin Mikhail Georgievich, master's, mishanuzhdin1@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 629.113
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-505-506

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНОЙ МЕТОДИКИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА НОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ С УЧЕТОМ КОНКУРЕНТНОГО РЫНКА

Р.Р. Гафаров, В.Н. Козловский, А.С. Клентак

В работе представлены результаты применения разработанной экспертной методики потребительской оценки качества автомобилей в эксплуатации с учетом конкурентного рынка.

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, автомобиль.

Рассмотрим применение экспертной методики потребительской оценки качества автомобилей для задач направленных на проведение бенчмаркинговых исследований в области потребительской оценки качества новых автомобилей в эксплуатации, при тех же условиях, что и в предыдущем случае оценки: температура воздуха от минус 7º С до +10º С; интенсивное городское движение, пригородное движение и на магистрали. В данном случае, как это было показано в процессе обоснования практического применения инструментария, проведем упрощение представления информации в качественном виде, отражающей достоинства и недостатки рассматриваемой продукции [1, 2].

Оценки удовлетворенности, проводим для модели автомобиля отечественного производства М2; японской модели автомобиля М3; французской модели автомобиля М4 и автомобиля американской марки М5.

Количественные оценки весомости влияния факторов эксплуатации новых автомобилей получены на основе опроса российских потребителей отечественной марки М2, как было предложено в разработанной методике.

Лепестковая диаграмма, определяющая уровень оценок инженеров-экспертов по вопросам удовлетворенности автомобилями по факторам, определяющим уровень удобства [3, 4] представлена на рисунке 1.

Далее в качестве примера рассмотрим результаты реализации предложенного инструментария по группе комплексных показателей, определяющих функции автомобиля: удобство водителя; комфортабельность для водителя; ходовые качества; ездовые качества.

На рисунке 2 представлена диаграмма отражающая распределение комплексных показателей по факторам, определяющим удобство водителя [5, 6].

Полученные данные, в качественной форме, позволяют сформулировать основные проблемные вопросы, которые могут оказать негативное влияние на формирование потребительской удовлетворенности отечественной марки автомобиля М2 в сравнении с автомобилями иностранного производства (М3, М4, М5): - возможно повреждение карманов острыми гранями ключа отпирания замков дверей; затруднено пользование личинкой замка двери: расположена слишком низко для водителя; затруднено пользование пультом дистанционного управления: мал размер кнопок и символов на них, не выделены цветом символы кнопок; затруднена распознаваемость клавиши блокировки центрального замка на подлокотнике обивки двери: не отличается по форме от клавиши блокировки привода стеклоподъемников, мал размер клавиши и символа на ней; затруднена видимость наружной ручки двери в условиях недостаточной освещенности: не выделена цветом; затруднено пользование наружной ручкой двери: мало рабочее пространство, возможно повреждение ногтями лакокрасочного покрытия облицовки наружной ручки двери при открывании; не оптимально соотношение ход-усилие на наружных ручках дверей: слишком мал холостой ход наружной ручки двери, повышенное усилие; повышенное усилие открывания и закрывания двери как снаружи, так и изнутри автомобиля; травмоопасен верхний угол передней двери при входе-выходе; затруднен вход/выход: мал максимальный угол открывания двери; затруднен вход-выход в ограниченном пространстве: одно промежуточное фиксированное положение двери, плохая четкость фиксации двери в этом положении; уплотнитель низа проема плохо защищен пластиковой накладкой: возможно его повреждение при входе-выходе; рулевое колесо заметно смещено вправо относительно сиденья водителя - большая несоосность «руль-сиденье-педали»; повышенное усилие на рукоятке фиксации / расфиксации механизма регулировки рулевого колеса; - затруднено принятие оптимальной рабочей

позы: отсутствует регулировка сиденья по высоте; затруднено пользование рукоятками регулировки сиденья: высокие усилия на рукоятках, мало рабочее пространство – контакт левой руки с обивкой стойки В и правой руки с обивкой центральной консоли; неприятные тактильные ощущения при пользовании рукоятками регулировки сиденья: облой в зоне хвата (у цилиндрического основания рукоятки регулировки угла наклона спинки и в торцевой части рукоятки продольной регулировки сиденья).

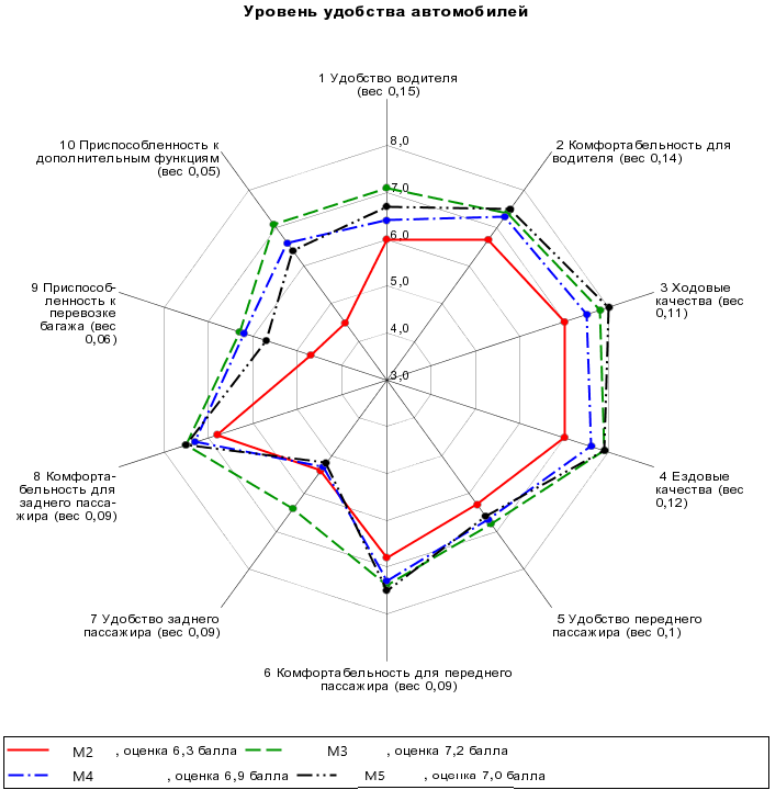


Рис. 1. Лепестковая диаграмма распределения бальных количественных оценок, по группе комплексных показателей отражающих уровень удобства автомобилей

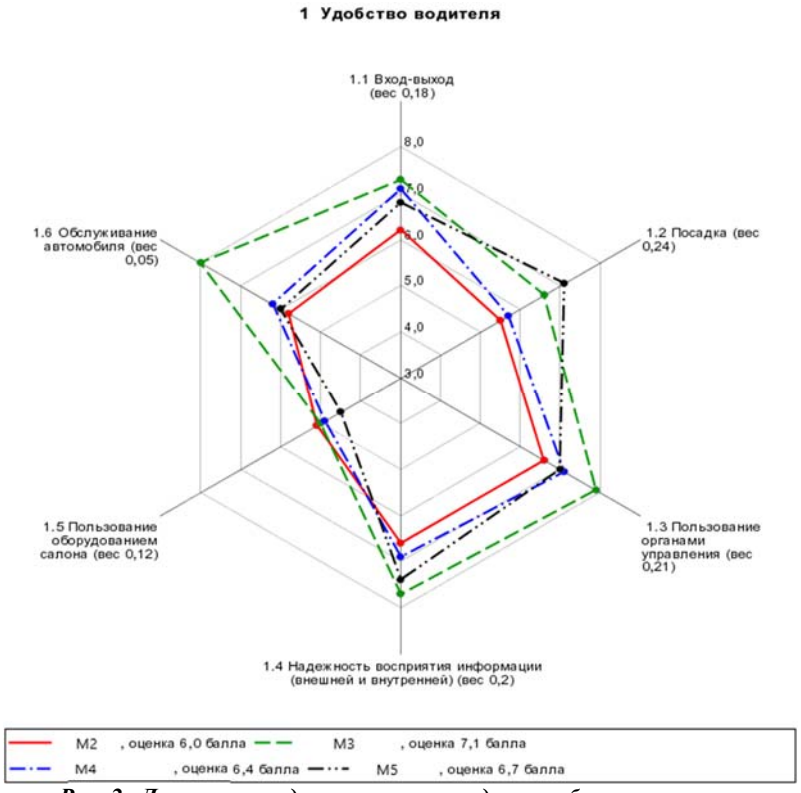


Рис. 2. Лепестковая диаграмма распределения бальных оценок, по группе комплексных показателей отражающих удобство водителя

Переходим к исследованию функции комфортабельность для водителя. На рисунке 3 представлена лепестковая диаграмма, отражающая распределение параметров, входящих в рассматриваемую функциональную группу.

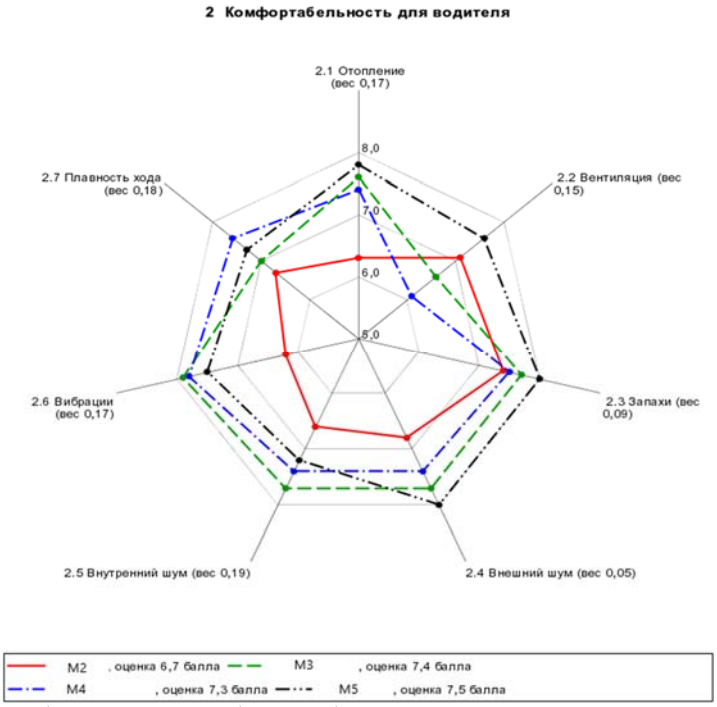


Рис. 3. Лепестковая диаграмма распределения бальных оценок, по группе комплексных показателей отражающих комфортабельность для водителя

Рассмотрим проблемные аспекты в эксплуатации автомобиля М2, выявленные посредством предложенного инструментария и относящиеся к функции комфортабельность для водителя.

Итак, по рассматриваемой функции наиболее значимыми проблемными вопросами, выделенными в ходе исследования являются: после запуска «холодного» двигателя длительное время из дефлекторов отопителя не поступает теплый воздух: повышенное время прогрева двигателя; отсутствует режим автоматического распределения потоков; не соответствует реальное распределение потоков воздуха заданным направлениям: при направлении потоков "в ноги" поток в большей степени распределяется на ветровое стекло; неравномерны потоки из разных дефлекторов: поток из центральных дефлекторов панели приборов больше, чем из боковых, в ноги водителя поступает меньший поток, чем в ноги переднего пассажира; неравномерный температурный режим воздуха в ногах: основной поток воздуха подается со стороны центральной консоли к одной ноге; длительное время (более 5 минут) до включения автоматического режима поддержания заданной температуры после пуска двигателя, имеющего температуру охлаждающей жидкости ниже 70ºС; неравномерная подача кондиционированного воздуха к ногам переднего пассажира: правая нога замерзает, а левая не охлаждается; дискомфорт от ощущения струй холодного кондиционированного воздуха; неприятный запах материалов интерьера, особенно после длительной стоянки автомобиля на солнце; громкий, неприятный звук срабатывания блокираторов привода замков дверей; неприятные звуки закрывания дверей; неприятный звук срабатывания пружин торсионов крышки багажника при ее открывании; неприятный шум пуска и выключения двигателя; повышенный шум двигателя на холостом ходу; сильный шум двигателя при разгоне; неприятный шум системы выпуска; повышенный уровень шума двигателя в движении на оборотах коленчатого вала более 3500 об/мин; повышенный шум работы электрического вентилятора системы охлаждения двигателя; повышенный шум коробки передач на холостом ходу, при движении на пониженных передачах и задним ходом, при торможении двигателем; стук подвесок при проезде единичных крупных неровностей на ходе отбоя и при съезде с бордюра; неприятные громкие звуки при открывании и особенно при закрывании двери; повышенный аэродинамический шум от стойки и от верхней кромки передней двери на скорости выше 60 км/ч: в том числе из-за плохого качества навески дверей и негерметичности уплотнителей; стук и скрип обивок салона и панели приборов при проезде дорожных неровностей; повышенный уровень вибраций на рулевом колесе, педали сцепления и кузове при пуске двигателя; сильные вибрации в режиме холостого хода на рукоятке рычага коробки передач; повышенный уровень вибраций в режиме холостого хода на рулевом колесе, сиденье, педалях, полу и обивке двери; передача толчков и вибраций от мелких дорожных неровностей: повышенное трение в шарнирах подвесок, неоптимальные характеристики амортизаторов на малых ходах; повышенный уровень вертикальных ускорений (толчки) от средних и крупных дорожных неровностей.

Переходим к анализу результатов применения инструментария при оценке функции ходовых качеств автомобиля. На рисунке 4 представлена лепестковая диаграмма отражающая распределение соответствующих комплексных показателей включенных в функцию.

Перечень проблемных вопросов, существенно влияющих на удовлетворенность потребителей при эксплуатации автомобиля М2, с точки зрения ходовых качеств включает в себя ряд позиций: чувствительность к боковому ветру на высокой (более 110 км/ч) скорости – рыскание, небольшие уводы в сторону; небольшое рыскание на высокой скорости, чувствительность к крупным волнообразным неровностям и продольной колее требуют коррек-

тирующих действий водителя; заметно отклонение от курса при резком сбросе "газа"; увод вправо при интенсивном ускорении на асфальте, увод в сторону при ускорении на неоднородном дорожном покрытии - отсутствует противобуксовочная система; плохое чувство центра рулевого управления из-за слабого возрастания момента на руле при отклонении из центра и наличия повышенного трения (вязкости) в околонулевой зоне поворота рулевого колеса; недостаточная информативность на малых углах поворота рулевого колеса: слабое возрастание момента от угла поворота РК, повышенное трение (вязкость) на рулевом колесе в околонулевой зоне; недостаточная информативность рулевого управления из-за слабого нарастания момента на углах поворота рулевого колеса до 60 градусов при скоростях до 70 км/ч; снижение точности управления из-за задержки реакции на поворот руля и больших углов поворота руля при скоростном маневрировании; рыскание автомобиля в повороте на дороге с пологими волнами; повышенные запаздывания реакции на быстрый поворот рулевого колеса; повышенная задержка реакции на доворот руля, особенно с полной нагрузкой; затруднена корректировка при возникновении заноса, особенно на скользких покрытиях - отсутствует электронная система динамической стабилизации (ESP); недостаточная точность управления при объезде непредвиденного препятствия: большие углы поворота и задержка реакции на поворот рулевого колеса.

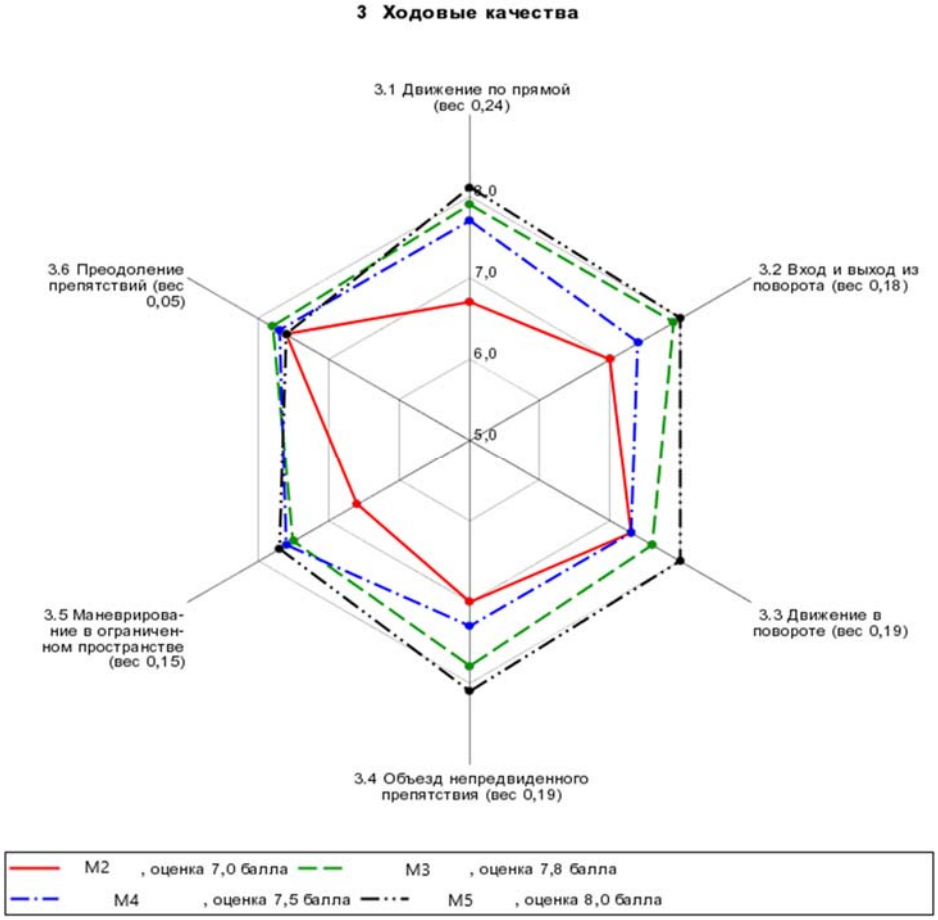


Рис. 4. Лепестковая диаграмма распределения бальных оценок, по группе комплексных показателей отражающих ходовые качества автомобиля

Приведем результаты исследования автомобилей по функции ездовые качества. На рисунке 5 представлена лепестковая диаграмма распределения комплексных показателей отражающих функцию ездовые качества автомобиля.

Также как и выше, представим в качественном виде данные отражающие выявленные проблемные вопросы, которые могут повлиять на удовлетворенность потребителей автомобилей модели М2. Позиции соответствующего списка включают в себя: - затруднено трогание: низкая чувствительность привода акселератора (предположительно из-за повышенного трения троса), большое усилие, «рывки»; затруднено трогание: повышенное усилие на педали сцепления, "жесткое" включение сцепления; затруднено трогание при работающем кондиционере: небольшой провал в работе двигателя, возможны вибрации и рывки вплоть до остановки двигателя; возможно создание аварийной ситуации при остановке двигателя в процессе трогания: невозможен быстрый перезапуск заглохнувшего двигателя в течение 5 сек.; возможно создание аварийной ситуации при остановке двигателя в процессе трогания: невозможен быстрый перезапуск заглохнувшего двигателя в течение 5 сек.; вызывает неудобство небольшой провал в тяге двигателя при плавном разгоне; затруднен разгон на скользких покрытиях; вызывает неудобство ухудшение разгонной динамики автомобиля с ростом его загрузки; затруднен быстрый разгон из-за неоптимальных передаточных чисел трансмиссии: разрыв между 1-й и 2-й передачами; затруднено поддержание заданной скорости из-за повышенного трения в приводе акселератора - происходят скачки скорости; недостаточная прогнозируемость замедления на неровной дороге и переходных покрытиях из-за неравномерности замедления; рыскание при торможении с высокой скорости; большой увод автомобиля в сторону большего сцепления при торможении на покрытии типа «микст», повышенный корректирующий угол поворота рулевого колеса в пределах 80-90 град.

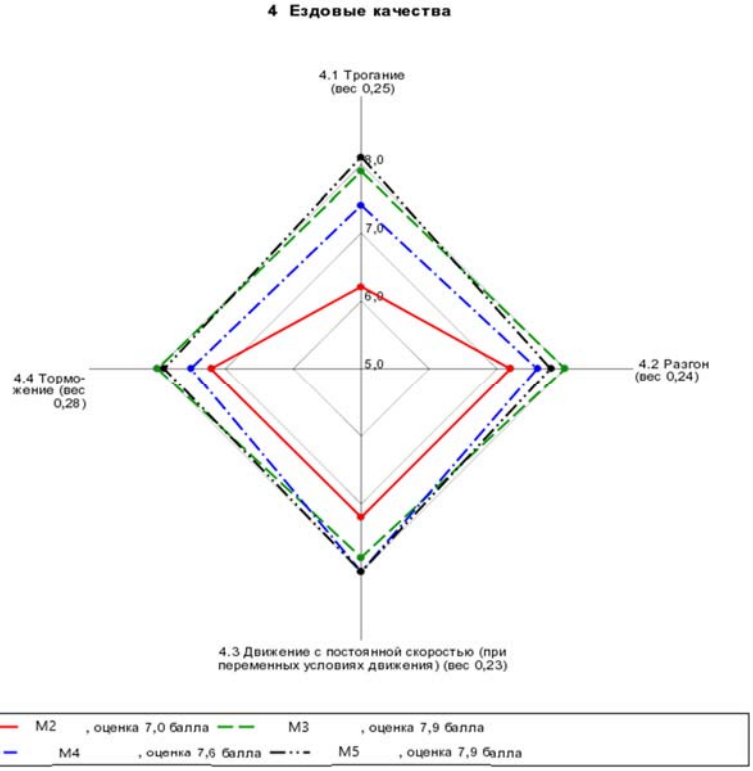


Рис. 5. Лепестковая диаграмма распределения бальных оценок, по группе комплексных показателей отражающих ездовые качества автомобиля

Наиболее значимые положительные замечания к автомобилю по автомобилю отечественного производства (М2): превосходит автомобили М4 и М5 по совокупности трех действий 1 уровня «Пользование оборудованием водителя / переднего / заднего пассажира» (в среднем 4,9; 4,7 и 3,7 соответственно) в основном за счет: наличия электрических приводов стеклоподъемников всех дверей и большего удобства пользования ими; наличия в передней и задней частях салона плафонов с индивидуальными секциями подсветки; наличия крупных часов в верхней части консоли панели приборов и большего удобства пользования ими; наличия прикуривателя и пепельниц в передней и задней частях салона.

Список литературы

1. Kozlovskiy V. Analytical models of mass media as a method of quality management in the automotive industry / V. Kozlovskiy, D. Aydarov // Quality - Access to Success. 2017. Т. 18. № 160. С. 83-87.

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. Козловский В.Н. Цифровая среда поддержки управления конкурентоспособностью / В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, Д.И. Панюков, М.М. Васильев // Стандарты и качество. 2018. № 6. С. 86-89.

4. 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.

5. Козловский В.Н. Аналитический комплекс прогнозирования надежности электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В.Н. Козловский, Н.И. Горбачевский, А.Г. Сорокин, В.Б. Кислинский, Л.Х. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 3. С. 227-229.

6. Панюков Д.И. Проектирование новых производственных процессов / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Г.Г. Слистина // Стандарты и качество. 2014. № 11. С. 92-95.

Гафаров Роман Ринатович, аспирант, gafarov01@gmail.com, 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,

Клентак Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, anna_klentak@mail.ru, Россия, Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

RESULTS OF IMPLEMENTATION OF EXPERT METHODOLOGY FOR CONSUMER ASSESSMENT OF THE QUALITY OF NEW CARS IN OPERATION

R.R. Gafarov, V.N. Kozlovsky, A.S. Klentak

The paper presents the results of applying the developed expert methodology for consumer assessment of the quality of cars in operation.

Key words: competitiveness, quality, car.

Gafarov Roman Rinatovich, postgraduate, gafarov01@gmail.com, 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,

Klentak Anna Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, anna_klentak@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University)

УДК 629.113
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-510-511

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНОЙ МЕТОДИКИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРИ ОЦЕНКЕ НОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ СОБСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Р.Р. Гафаров, В.Н. Козловский, А.С. Клентак

В статье представлены результаты применения экспертной методики потребительской оценки качества новых автомобилей в эксплуатации.

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, автомобиль.

Переходим к вопросу оценки качества новых автомобилей глазами экспертов с учетом полученных ранее данных [1 – 4].

Оценка автомобилем производилась согласно предложенной методике.

Климатические условия: температура воздуха от минус 7º С до +10º С.

Выявление неудобств производилось при опытной эксплуатации Модели 1 автомобиля (далее автомобиля, М1) в условиях интенсивного городского движения, пригородного движения и на магистрали.

На рисунке 1 представлена лепестковая диаграмма отражающая оценку качества новых автомобилей М1 рассматриваемой марки и модели по комплексным параметрам [5]: удобство водителя; удобство переднего пассажира для рассматриваемой модели автомобиля; удобство заднего пассажира; приспособленность к перевозке багажа; приспособленность к дополнительным функциям.

При формировании количественной оценки бальной оценки, в соответствии с принятой шкалой оценки качества автомобиля, получаем данные показывающие, что наиболее высокие оценки получены по вопросам пользования дверью направлениям удобство переднего пассажира и удобство водителя [6].

В качестве примера представим часть оценочных выводов в качественной форме, сформированных на основе предлагаемого инструментария в процессе инженерно-экспертной оценки автомобилей [7].

Качественная инженерно-экспертная информация, отражающая аспекты возможной неудовлетворенности и жалоб по рассматриваемым факторам пользования водительской дверью включает в себя позиции [8]: затруднено пользование ключом отпирания замков дверей: необходима идентификация ключа из связки с ключом зажигания; затруднена видимость личинки на фоне наружной ручки двери; возможно повреждение карманов или лакокрасочного покрытия кузова (при непопадании в личинку) острыми гранями ключа отпирания замков дверей; повышенное усилие ввода (вынимания) ключа замков дверей в личинку; затруднен поворот ключа в замке двери: повышенное усилие, особенно при блокировке замка, мал размер рукоятки ключа; направление поворота ключа при блокировке / разблокировке замка двери визуально и логически соответствует противоположному от совершаемого действия (разблокировке / блокировке соответственно); отсутствует комплектация с центральным замком и возможностью дистанционного управления замками дверей снаружи автомобиля; затруднено визуальное определение состояния блокировки замков дверей: кнопки блокировки не выделены цветом и имеют разную величину выступания относительно обивок разных дверей; повышенное усилие на кнопке блокировки замка двери, особенно при разблокировании; затруднено пользование наружной ручкой двери: неестественный хват, повышенное усилие на ручке при открывании; затруднено пользование внутренней ручкой открывания двери; высокое усилие закрывания двери, плохая четкость закрывания.

Проблемные аспекты по фактору перемещения в проеме двери включают следующие позиции: затруднен вход-выход в ограниченном пространстве: отсутствуют промежуточные фиксированные положения двери; возможно загрязнение одежды о порог при входе-выходе.

По фактору попадание на сидение, выделяем следующие проблемные позиции: затруднено попадание на сиденье водителя: контакт с жестким ребром на торце подушки сиденья, возможен контакт стопы с острым краем салазок сиденья; затруднено попадание на сиденье (и выход с сиденья): контакт ног водителя с рулевым колесом - недостаточно расстояние от подушки сиденья до рулевого колеса;

По фактору откидывание и возврат переднего сиденья, выделяем проблемные позиции: затруднена видимость, распознание и досягаемость рукоятки расфиксации сиденья и символа направления воздействия на нее: не видна и плохо досягаема рукоятка за центральной стойкой при установке сиденья во второй половине диапазона продольной регулировки, рукоятка черного цвета плохо видна на фоне черной обивки сиденья, символ в виде стрелки черного цвета плохо виден на фоне рукоятки; затруднено откидывание переднего сиденья: контакт подголовника (в верхнем диапазоне регулировки по высоте) с накладкой обивки потолка; затруднено откидывание / возврат переднего сиденья: повышенное усилие откидывания спинки и перемещения подушки, плохая четкость срабатывания механизма фиксации / расфиксации; затруднено откидывание правого сиденья с места водителя: рукоятка расфиксации расположена с правой стороны спинки;

Рис. 1. Лепестковая диаграмма распределения количественных оценок по группе комплексных показателей

Проблемные аспекты по фактору «световая и звуковая сигнализация» включают: не включается освещение салона при отпирании замка двери; недостаточна освещенность салона при открывании двери в условиях недостаточной освещенности: не включаются индивидуальные секции переднего плафона; отсутствует звуковая и световая сигнализация при несанкционированном открывании дверей, крышки капота или багажника; отсутствует световая сигнализация при незакрытых крышках капота / багажника и не полностью закрытых дверях (на один щелчок замка);

На рисунке 2 представлена лепестковая диаграмма отражающая оценку качества новых автомобилей М1 рассматриваемой марки и модели по комплексным параметрам виброакустического комфорта.

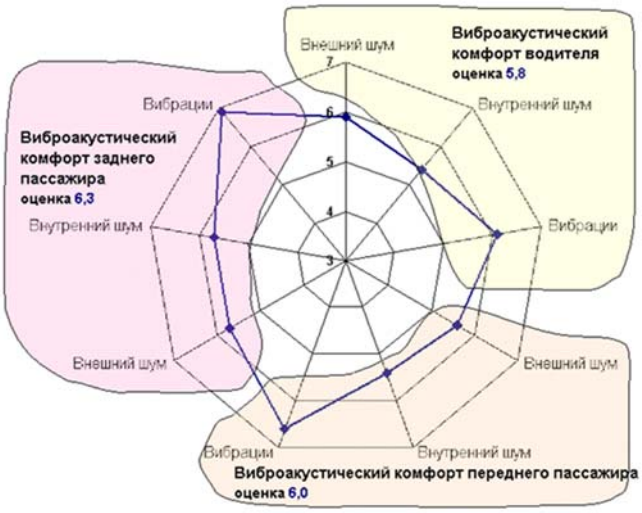


Рис. 2. Лепестковая диаграмма распределения количественных параметров оценки, по группе комплексных показателей отражающих виброакустический комфорт автомобиля

Прежде всего выделим позицию с наибольшей количественной бальной оценкой – это виброакустический комфорт заднего пассажира.

Теперь рассмотрим в качественной форме позиции, отражающие проблемные аспекты, которые были вскрыты при реализации предложенного инструментария и которые наиболее остро способны повлиять на потребительскую удовлетворенность.

По параметрам, отражающим внешний шум автомобиля: громкий звук работы двигателя на холостом ходу спереди автомобиля, особенно холодного двигателя (при температуре окружающего воздуха ниже 20°С) или при работающих вентиляторах систем охлаждения / отопления; неприятные звуки при пользовании дверями и крышкой капота: громкий щелчок при срабатывании ограничителей боковых дверей, сильный шум при закрывании (особенно двери задка и крышки капота); неприятная тональность звукового сигнала.

По параметрам, отражающим внутренний шум.

Шум двигателя и его систем: громкий шум работы электробензонасоса, особенно при включении зажигания; громкий, неприятный шум при пуске двигателя; громкий звук работы двигателя на холостом ходу, особенно холодного двигателя при температуре окружающего воздуха ниже 20°С; шумная работа вентилятора системы охлаждения двигателя в режиме холостого хода на стоянке или в пробках; высокий шум двигателя в режиме разгона, при постоянных скоростях движения и в режиме торможения двигателем.

Шум коробки переключения передач и приводных валов: неприятный шум трансмиссии, особенно при интенсивном разгоне; высокий шум подшипников коробки передач, исчезающий при выжиме педали сцепления; повышенный шум коробки передач при температуре окружающего воздуха ниже 20°С; повышенный шум коробки передач при движении задним ходом и торможении двигателем.

Шум кузова: неприятные звуки при пользовании дверями и крышкой капота: громкий щелчок при срабатывании ограничителей боковых дверей, сильный шум при закрывании (особенно двери задка и крышки капота); неприятные громкие скрипы при пользовании подлокотником обивки двери; громкий щелчок при продольной регулировке сиденья; высокий аэродинамический шум при скоростях движения выше 80 км/ч; пульсирующий резонансный гул с пиком на скорости около 65 км/ч.

Звуки, сопровождающие пользование органами управления и оборудованием салона: скрип при выжиме педали сцепления; скрип щеток стеклоочистителя по стеклу, неприятный шум при «перекладывании» щеток; громкие неприятные щелчки при пользовании подрулевыми переключателями; высокий шум при работе вентилятора отопителя, особенно после пуска при низкой температуре окружающего воздуха или при движении в городе с частыми остановками.

По факторам вибрации выделяем ряд проблемных позиций, прежде всего связанных с возможной неудовлетворенностью водителя: высокий уровень вибраций на органах управления и кузове при пуске двигателя, особенно холодного двигателя при температуре окружающего воздуха ниже 20°С; сильные вибрации в режиме холостого хода на полу и рукоятке рычага коробки передач; повышенные вибрации в режиме холостого хода на сиденье, педалях и обивке двери; небольшие вибрации в режиме холостого хода на рулевом колесе; сильные вибрации на полу и рукоятке рычага коробки передач при движении в городе; повышенные вибрации на сиденье, руле при движении в городе, передающиеся от мелких неровностей дороги и от силового агрегата во всех режимах движения; сильные вибрации на полу при движении за городом, особенно при скорости 90-110 км/ч; повышенные вибрации на сиденье, обивке двери при движении за городом, передающиеся от мелких неровностей дороги и от силового агрегата, особенно при скорости 90-110 км/ч.

На рисунке 3 представлена лепестковая диаграмма отражающая распределение показателей отражающих потребительскую функцию климатического комфорта автомобиля М1.

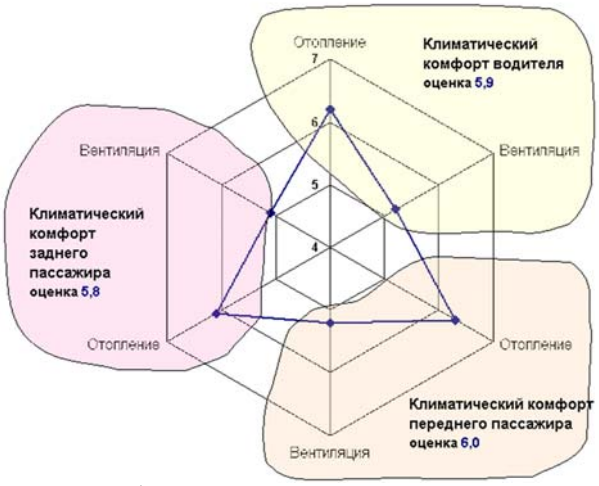


Рис. 3. Лепестковая диаграмма распределения количественных параметров оценки, по группе комплексных показателей отражающих климатический комфорт автомобиля

Наиболее высокой оценкой, для рассматриваемого автомобиля, обладает оценка климатического комфорта переднего пассажира.

Рассмотрим проблемные аспекты выделенной функции: не достаточный диапазон изменения силы потоков воздуха из дефлекторов - всего две скорости вентилятора отопителя: велика сила потоков на минимальной скорости и недостаточна сила потоков на максимальной скорости; сложно добиться равномерности потоков из разных дефлекторов: дефлектор "ноги", боковые и центральные дефлекторы панели приборов не связаны между собой; не соответствует реальное распределение потоков воздуха заданным направлениям: вне зависимости от заданного распределения потоков во всех дефлекторах всегда остаются "паразитные" потоки; отсутствует регулировка направления и силы потока из боковых дефлекторов панели приборов, нельзя полностью перекрыть один из боковых дефлекторов; не оптимальна подача потока воздуха в ноги: поток направлен в ближнюю к консоли ногу, невозможно полностью перекрыть поток; неравномерный температурный режим воздуха в ногах: основной поток воздуха подается со стороны центральной консоли к одной ноге; повышенная трудоемкость поддержания заданной температуры воздуха в салоне: отсутствует режим автоматического поддержания заданной температуры, мал рабочий ход рычага задатчика температуры воздуха, неатермальные стекла.

На рисунке 4 представлена лепестковая диаграмма отражающая бальные количественные оценки инженеров-экспертов при реализации предложенного инструментария для функции ходовых свойств автомобиля М1.

Исходя из полученных данных (рисунок 4), наивысшая оценка по рассматриваемой комплексной функции достигнута по параметрам вертикального комфорта при движении по большим, средним и мелким неровностям.

Переходим к анализу проблемных аспектов выявленных в процессе оценки функции ходовых свойств автомобиля. Итак, проблемные позиции включают в себя вопросы: плохое чувство центра рулевого управления из-за слабого возрастания момента на руле при отклонении из центра; недостаточная реакция при повороте рулевого колеса на большие углы; велики углы поворота рулевого колеса на переставке (большие углы увода шин); большие углы поворота при быстрой смене полосы; низкая скорость самовозврата рулевого колеса; отсутствие необходимой реакции из-за блокировки обоих колес передней оси; недостаточная траекторная устойчивость при торможении на прямой – увод автомобиля то влево, то вправо; высокое усилие на рычаге стояночного тормоза.

На рисунке 5 представлена лепестковая диаграмма отражающая бальные количественные оценки инженеров-экспертов при реализации предложенного инструментария для функции ездовые свойства автомобиля М1.

Рис. 4. Лепестковая диаграмма распределения бальных количественных параметров оценки, по группе комплексных показателей отражающих ходовые свойства автомобиля

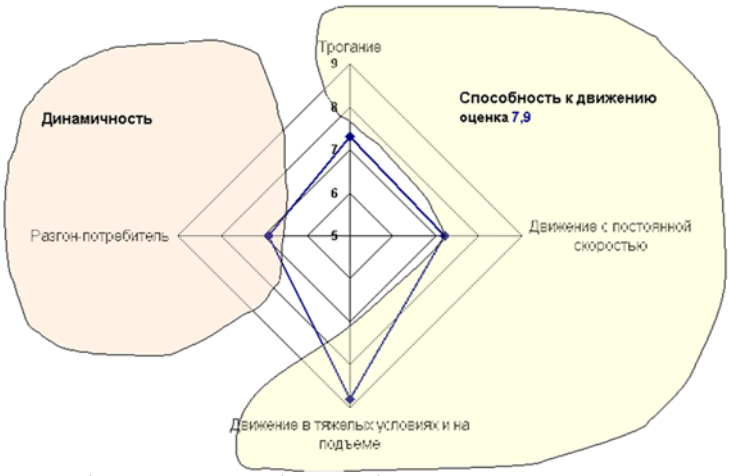


Рис. 5. Лепестковая диаграмма распределения бальных количественных параметров оценки, по группе комплексных показателей отражающих ездовые свойства автомобиля

Проблемные аспекты по рассматриваемой функции включают в себя следующие позиции: недостаточная информативность начала включения сцепления из-за повышенного усилия на педали в первой половине хода; затруднено мягкое трогание из-за повышенного усилия на педали сцепления в первой половине хода, небольшой провал в работе двигателя при трогании; затруднено интенсивное трогание из-за рывков, «провалов» в работе двигателя; затруднено трогание из-за рывков, «провалов» в работе двигателя при трогании; недостаточная точность дозирования подачи топлива при медленном нажатии на педаль акселератора (когда требуется точность выбора скорости), особенно на малых скоростях и при движении задним ходом – дозировка подачи топлива происходит ступенчато (скачкообразно) из-за повышенного трения в приводе; повышенная трудоемкость на скоростях движения выше 90 км/ч – чувствительность к ветру, подъемам – требуется частая корректировка акселератором; толчки, дергания при увеличении подачи топлива при движении на 1-й и 2-й передачах. возможно создание аварийной ситуации: самовыключение рычага раздаточной коробки в положение «нейтраль» после использования раздаточной коробки в тяжелых условиях;

Выделяем проблемные вопросы по группе «динамичность»: избыточная чувствительность педали акселератора: скачкообразное перемещение педали из-за трения в приводе при медленном нажатии – затруднено точное дозирование подачи топлива; повышенное усилие страгивания педали акселератора (трение в приводе), затруднено плавное дозирование подачи топлива; повышенное усилие и недостаточная четкость включения II и III передач при интенсивном разгоне, возможно ошибочное включение V передачи вместо III; заметное снижение динамики разгона после 90 км/ч и особенно после 120 км/ч.

Переходим к анализу общих функций. На рисунке 6 представлена лепестковая диаграмма, отражающая бальные количественные оценки инженеров-экспертов при реализации предложенного инструментария для соответствующей функции (автомобиль М1).

Анализ полученных данных показывает, что наибольшие положительные бальные оценки получены по группам комплексных показателей: пусковые качества; заправляемость; адаптированность к эксплуатации на плохих дорогах.

Перейдем к перечислению выявленных проблемных вопросов, которые создают препятствуют повышению удовлетворенности потребителей качеством автомобилей в эксплуатации: отсутствует возможность установки тягово-сцепного устройства без механической обработки кузова; невозможен доступ в багажное отделение с присоединенным прицепом со стороны заднего крыла; из-за отсутствия салонного фильтра пыль проникает в салон; неэф-

фективные дверные уплотнители: быстрое загрязнение проемов дверей; загрязнение подкапотного пространства набегающим потоком и грязью из-под колес в ненастную погоду; недостаточная защита от коррозии штатной защиты картера и стального брызговика двигателя: посредственное качество окраски.

Обобщение полученных результатов применения инструментария. Обобщенные показатели потребительских функций рассматриваемой марки и модели автомобиля М1 находятся в диапазоне оценок «удовлетворительно – на грани удовлетворительно / неудовлетворительно» по следующим функциям: эргономика - 5,6 балла; климатический комфорт - 5,9 балла; виброакустический комфорт - 6,0 балла; общие функции - 6,5 балла; ходовые свойства - 7,4 балла.

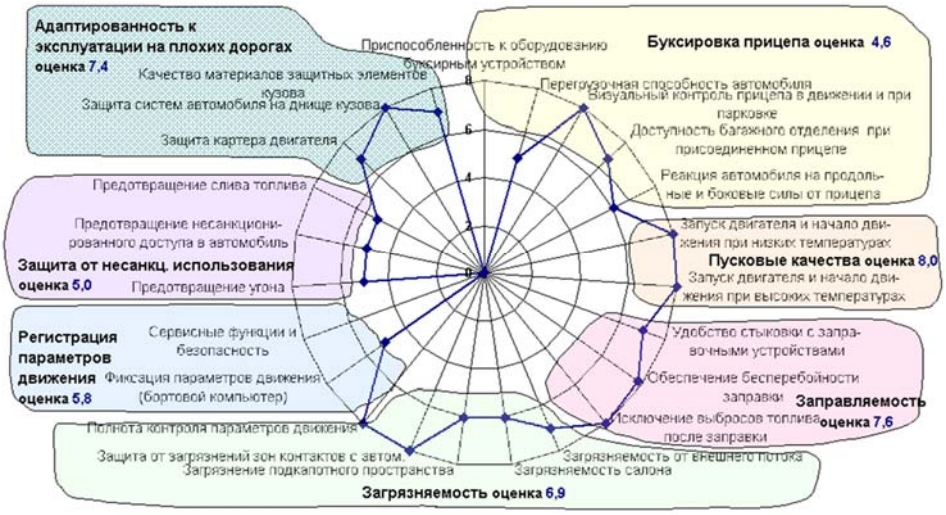


Рис. 6. Лепестковая диаграмма распределения бальных количественных параметров оценки, по группе комплексных показателей отражающих общие функции автомобиля

Потребительские свойства автомобиля М1, интегральная оценка которых является неудовлетворительной (и ниже) для потребителя (5,4 и ниже баллов), включает следующие позиции функций: удобство заднего пассажира - 4,6 балла; буксирование прицепа - 4,6 балла; защита от несанкционированного использования - 5,0 балла; приспособленность к перевозке багажа - 5,1 балла.

Потребительские свойства автомобиля М1, интегральная оценка которых является предельной (на грани удовлетворительно/неудовлетворительно) для потребителя (в диапазоне от 5,5 до 6,4 баллов): приспособленность к дополнительным функциям - 5,7 балла; регистрация параметров движения - 5,8 балла; виброакустический комфорт водителя / переднего / заднего пассажира - 5,8 / 6,0 / 6,3 балла; климатический комфорт водителя / переднего / заднего пассажира - 5,9 / 6,0 / 5,8 балла; удобство водителя / переднего пассажира - 5,9 / 6,1 балла.

Неудовлетворительные (5,4 и ниже баллов) интегральные оценки для потребителя (5,4 и ниже баллов): приспособленность к оборудованию буксирным устройством - 0 балла; сервисные функции и безопасность - 0 балла; приспособленность к перевозке багажа в салоне - 2,7 балла; пользование оборудованием салона для водителя / пер. / зад. / пассаж. - 4,6 / 4,5 / 2,2 балла; приспособленность к перевозке багажа в багажном отделении - 4,8 балла; вход-выход задних пассажиров - 5,0 балла; посадка задних пассажиров - 5,0 балла; предотвращение угона - 5,0 балла; предотвращение несанкционированного доступа в автомобиль - 5,0 балла; перегрузочная способность автомобиля - 5,0 балла; фиксация параметров движения - 5,0 балла; предотвращение слива топлива - 5,0 балла; вентиляция для водителя / переднего / заднего пассажира - 5,2 / 5,2 / 5,1 балла; отдых в автомобиле - 5,2 балла; работа в автомобиле - 5,3 балла; внутренний шум для водителя / переднего пассажира - 5,4 балла.

Интегральная функций является плохой (и ниже) для потребителя (4,4 и ниже баллов) по следующим пунктам: органы управления раздаточной коробкой / блокировкой дифференциала - 3,5 балла; размещение стаканов, банок и т.п. в салоне - 3,5 балла; трудоемкость поддержания заданной температуры при вентиляции для водителя / переднего / заднего пассажира - 3,7 / 3,7 / 3,7 балла; шум двигателя и его систем для водителя / переднего пассажира - 4,0 / 4,0 балла; шум коробки передач и приводных валов для водителя / передн. пассажира - 4,0 / 4,0 балла; перемещение в проеме двери для заднего пассажира - 4,0 балла; размещение багажа - 4,0 балла; достаточность и удобство других мест для размещения мелких вещей (в салоне) - 4,0 балла; распределение потоков воздуха из дефлекторов климатической системы при отоплении для водителя - 4,0 балла; пользование дверью багажника - 4,3 балла; работа в задней части салона - 4,3 балла.

Наиболее высоко оцененные функции автомобиля М1, интегральная оценка которых является отличной (и выше) для потребителя (8,5 и выше баллов): эффективность преодоления подъемов - 9,0 балла; эффективность движения в тяжелых условиях - 8,5 балла; движение с минимально устойчивой скоростью - 8,5 балла; трансформация переднего пассажирского сиденья - 8,5 балла.

Рекомендации по результатам оценки качества новых автомобилей М1. Рекомендуется проработать возможность внедрения следующих малозатратных мероприятий по заметному повышению уровня потребительских свойств автомобиля: внедрить единый ключ зажигания и замков дверей с симметричной бородкой вместо двух разных ключей (кроме снижения номенклатуры изделий значительно улучшится удобство пользования замками двери и зажигания); увеличить длину передних щеток на 45% (для увеличения зон обзора вперед); увеличить длины задней щетки на 25 мм (для увеличения зон обзора назад); внедрить карманы на обивках дверей и спинке передних сидений; ввести ручку на обивке боковины кузова для заднего пассажира; ввести внутреннюю ручку для закрывания двери задка

Список литературы

1. Козловский, В. Комплексная оценка удовлетворенности потребителей качеством автомобилей / В. Козловский, В. Строганов, С. Клейменов // Стандарты и качество. 2013. № 5. С. 94-98.
2. 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.
3. Козловский, В.Н. Комплекс обеспечения качества системы электрооборудования автомобилей / В.Н. Козловский, Д.И. Панюков // Saarbrücken, 2014.
4. Панюков, Д.И. Фундаментальные основы FMEA для автомобилестроения / Панюков Д.И., Козловский В.Н. // Монография / Самара, 2014.
5. Козловский, В.Н. Моделирование энергоемких накопителей автомобильной комбинированной энергоустановки / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, С.В. Петровский Грузовик. 2018. № 11. С. 13-14.
6. 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.
7. Козловский, В.Н. Аналитический комплекс прогнозирования надежности электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В.Н. Козловский, Н.И. Горбачевский, А.Г. Сорокин, В.Б. Кислинский, Л.Х. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 3. С. 227-229.
8. Козловский, В.Н. Цифровая среда поддержки управления конкурентоспособностью / В.Н. Козловский, Д.В.Айдаров, Д.И. Панюков, М.М. Васильев // Стандарты и качество. 2018. № 6. С. 86-89.

Гафаров Роман Ринатович, аспирант, gafarov01@gmail.com, 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,

Клентак Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, anna_klentak@mail.ru, Россия, Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

RESULTS OF IMPLEMENTATION OF EXPERT METHODOLOGY FOR CONSUMER QUALITY ASSESSMENT WHEN ASSESSING NEW VEHICLES OF OWN PRODUCTION

R.R. Gafarov, V.N. Kozlovsky, A.S. Klentak

The article presents the results of applying an expert methodology for consumer assessment of the quality of new cars in use.

Key words: competitiveness, quality, car.

Gafarov Roman Rinatovich, postgraduate, gafarov01@gmail.com, 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,

Klentak Anna Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, anna_klentak@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University)

УДК 629.113
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-515-516

ОБЗОР ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ КОДИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ АВТОМОБИЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Н.А. Антонова, В.Н. Козловский, А.С. Клентак

В статье представлены результаты исследования опыта лидеров мирового автомобильного производства при решении задачи по организации процесса кодификации дефектов автомобилей в период эксплуатации

Ключевые слова: конкурентоспособность, качество, автомобильная промышленность, кодификация дефектов, эксплуатация.

Для международного опыта в решении задачи по организации кодификации дефектов автомобилей в период эксплуатации, характерен подход, когда при кодировании дефекта отталкиваются от симптоматики проявления дефектов, которые замечены клиентом. Здесь наблюдается более широкий подход к кодированию проблемы качества автомобилей, когда под одним и тем же кодом, подразумевается несколько возможных причин [1].

Приведем ряд примеров. В таблице представлена часть кодов дефектов стандартного кодификатора, используемого компанией Renault.

Таблица с примерами кодификации дефектов автомобилей компании Renault

Коды кодификатора жалоб клиентов на продукцию			
Раздел	Код	Описание	Примеры
Кузов и передний капот	120 (шум) не ветер	Шумы, вибрации на кузове, на элементах неподвижного остекления (лобовое стекло, боковые панели), на элементах защиты кузова, на стыках с элементами (бамперы, боковые планки и т.п.) и аксессуарами обтекаемой формы (спойлер и т.п.).	Легкий скрип в секции крыши со стороны водителя, в панели. Я слышу шум по всей машине. Я слышу шум, когда еду по ухабистой дороге. Я слышу шум сзади. Этот шум издает задний бампер. Он вибрирует; это неправильно.
	0150: Кузов: деформация панели	Дефекты кузова (деформация листового металла: дыры, неровности, впадины, складки) внутрии снаружи автомобиля (включая открывающиеся элементы).	Вот небольшой след от удара на переднем левом крыле, очевидно, появившийся во время транспортировки, доставки. Двери были помяты и над ручками двух задних дверей.
	0151: Кузов: зазоры, регулировка	Ошибки в выравнивании панелей, зазорах, смещениях или дефектной сборке между различными кузовами. Панельные элементы, за исключением дверей и других открывающихся элементов.	Панель заднего порога не могла оставаться закрепленной из-за неправильного крепления или сборки во время производства, клипсы крепления отсутствовали.
Краска, мастика, антикоррозия	0340: Корпус: водонепроницаемость	Проблемы с гидроизоляцией и проникновением в кузов (в том числе лючок бензобака, без учета открывающихся элементов и осветительных линз.	Вода просачивалась из-под машины, возле двух передних сидений. Это было соединение двух панелей кузова.
	0350:Кузов/лакокрасочное покрытие:появление	Дефекты окраски (царапины, неровности, отслаивания и т.п.) внутри и снаружи кузова. (включая открывающиеся элементы), за исключением наружных аксессуаров.	По соглашению, код 0350 также используется для проблем, связанных с: - пятна на кузове (смола, жир, масло) при доставке, - отслаивание краски вследствие града или выступов агрегатов.
	0351:Кузов:коррозия	Проблема ржавчины внутри и снаружи кузова (включая открывающиеся элементы), исключая внешние аксессуары.	У меня была ржавчина на задней левой двери. У замка. Были лишь небольшие пятна
Двигатель	0520: Двигатель – шум, вибрация	Шум, акустическая вибрация двигателя (блока двигателя, турбокомпрессора, охлаждения и освещения). системы).	У меня проблема с вентилятором двигателя. При включении он издает очень громкий шум, настоящее урчание. Когда холодно, при запуске первые 2-3 минуты издает дребезжащий звук. Как только прогреется, это обычный дизельный звук. У меня внутри двигателя слышен шум на 2000 оборотах. Кажется, он гоночный.
	0550:Моторный отсек	Неправильный внешний вид и крепление шумоизоляционных материалов внутри двигателя, капота, а также проблемы, связанные с внешним видом или креплением элементов двигателя (шланги, винты, кабели и т. д.) без каких-либо других последствий.	Внутри двигателя был оторван трос.
	0570: Двигатель – плохой запуск, глохнет на холостом ходу	Неисправности запуска на холодном двигателе, в том числе происшествия, произошедшие в первые 5 километров пробега. вождение (остановка, рывки, нестабильные обороты двигателя, недостаток мощности).	У моего автомобиля были проблемы с запуском. Оно застряло. Началось, но это заняло некоторое время. Это произошло только в утром при холодном запуске. Он дернулся сразу после запуска. Думаю, это недостаток топлива, которое не доходит до двигателя. Это происходит, когда автомобиль холодный; движется толчками, но только при трогании.

Окончание таблицы

Раздел	Код	Описание	Примеры
Двигатель	0572: Двигатель - неравномерный холостой ход, глохнет, обороты	Проблемы оборотов двигателя, нестабильность холостого хода, остановка двигателя, независимые от холодного запуска проблемы.	Когда двигатель был теплым, он не работал на холостом ходу. Он глох, как только я ехал. 50 км. Заводится нормально, но автоматический стартер срабатывает даже при прогретом двигателе очень высокая скорость в течение нескольких секунд.
	0573: Двигатель: недостаточная мощность	Недостаток мощности, отзывчивости, подхвата или ускорения, независимо от проблемы с холодным запуском	Недостаточная мощность двигателя. В горных районах с этим проблемы, как только включается кондиционер. Двигатель не работает так, как должен. Он слаб. Опасно при обгоне.
Коробка передач	0620:Сцепление:шум без педали	Шумы, свист сцепления, не включая педаль сцепления.	На холодном двигателе, когда я выжимаю сцепление, чтобы переключиться на первую, я слышу в сцеплении стон, как будто оно скользило.
	0621: Механическая коробка передач: шум	Четко выраженный механический шум и свист в механической коробке передач, не считая шумов из-за затрудненного переключения передач	Коробка передач свистела на высоких оборотах двигателя.
	0650: Рычаг КПП - внешний вид	Дефекты внешнего вида и крепления рычага, ручки или чехла механической коробки передач у основания.	Оторвалась ручка рычага переключения передач. Резьба была дефектная.
	0670: Сцепление – работа	Четко выявленные проблемы в работе сцепления, не включая педаль сцепления.	Переключение передач было не плавным. Я чувствую, как сцепление проскальзывает, когда двигатель холодный. Нет четкого выключения, когда я отпускаю педаль газа.

Уже при первичном рассмотрении, видна принципиальная разница между принципами кодирования дефектов, которые используют в своей работе отечественные автопроизводители и соответствующими принципами используемыми иностранными автосборочными предприятиями. В первом случае, правила кодирования определяются, по сути, при разработке, когда формируется в полной мере конструкция нового автомобиля, такой подход можно назвать в чистом виде инженерным, или если рассматривать его по аналогии с принципами производства - выталкивающим принципом. Второй принцип кодирования, используемый иностранными автопроизводителями исходит из оценки потребительских ощущений при эксплуатации автомобилей, его можно назвать потребительским, или по аналогии с принципами организации производства – вытягивающим [2, 3].

В подтверждении сделанного вывода, на рисунке 1 представлен слайд, отражающий правила кодификации дефектов автомобилей производства рассматриваемого автопроизводителя.

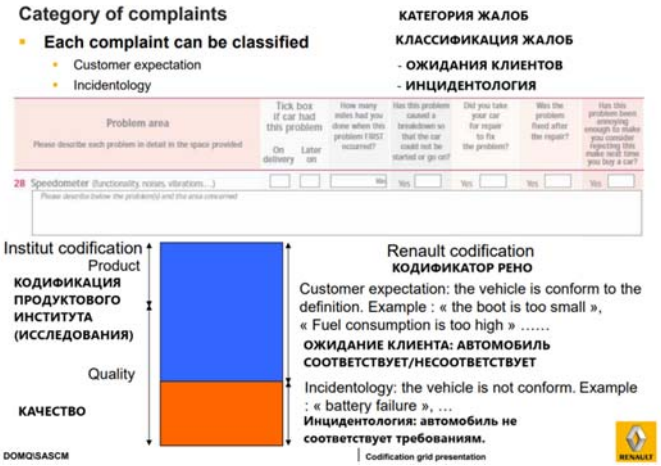
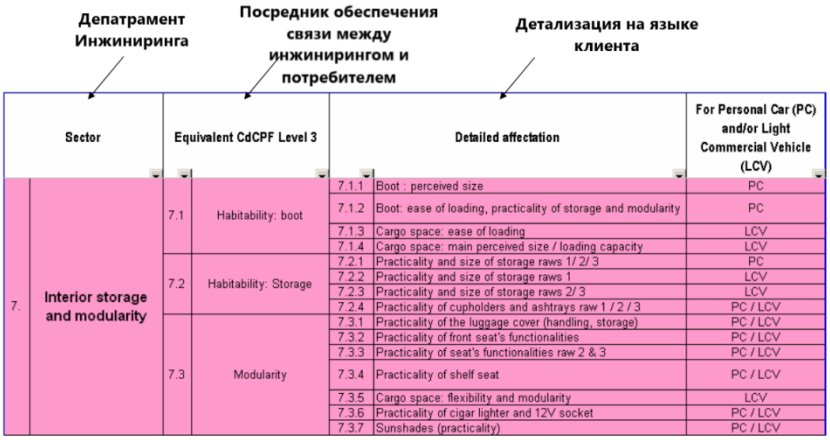


Рис. 1. Кодификация проблем качества автомобилей в эксплуатации в компании Renault

Анализ информации представленной на рисунке 1 показывает, что иностранными автопроизводителями при кодификации проблем качества автомобилей используется два кодификатора [4]. Один отвечает за кодификацию жалоб потребителей, когда оценивается ожидание клиентов к автомобилю. Такая оценка проводится как при проведении исследований в области потребительской удовлетворенности качеством продукции, так и через опрос на

предприятии фирменного автосервиса. Второй работает только в области инцидентологии, когда оцениваются жалобы потребителей к продукции, которые привели к поломке и проведению гарантийного ремонта автомобилей [5, 6]. Как видно, кодификаторы синхронизированы и гармонизированы друг относительно друга.

На рисунке 2 представлена модульная структура кодификации дефектов принятая в иностранной компании автопроизводителя.



Sector		Equivalent CdCPF Level 3		Detailed affectation		For Personal Car (PC) and/or Light Commercial Vehicle (LCV)
7.	Interior storage and modularity	7.1	Habitability: boot	7.1.1	Boot : perceived size	PC
				7.1.2	Boot: ease of loading, practicality of storage and modularity	PC
				7.1.3	Cargo space: ease of loading	LCV
				7.1.4	Cargo space: main perceived size / loading capacity	LCV
		7.2	Habitability: Storage	7.2.1	Practicality and size of storage raws 1/ 2/ 3	PC
				7.2.2	Practicality and size of storage raws 1	LCV
				7.2.3	Practicality and size of storage raws 2/ 3	LCV
				7.2.4	Practicality of cupholders and ashtrays raw 1 / 2 / 3	PC / LCV
		7.3	Modularity	7.3.1	Practicality of the luggage cover (handling, storage)	PC / LCV
				7.3.2	Practicality of front seat's functionalities	PC / LCV
				7.3.3	Practicality of seat's functionalities raw 2 & 3	PC / LCV
				7.3.4	Practicality of shelf seat	PC / LCV
				7.3.5	Cargo space: flexibility and modularity	LCV
				7.3.6	Practicality of cigar lighter and 12V socket	PC / LCV
				7.3.7	Sunshades (practicality)	PC / LCV

Рис. 2. Модульная структура электронного окна кодификатора дефектов компании Renault

Итак, представленная на рисунке 2 модульная структура показывает, что в процессе кодификации дефектов в компании Renault задействовано как минимум три подразделения: инженерная служба определяющая принадлежность дефекта к функциональной системе или узлу автомобиля; служба занимающаяся подробным описанием дефекта с языка потребителя (клиента); служба – посредник, которая осуществляет перевод описания дефекта (жалобы) на инженерный язык принятый в компании.

Таким образом, уже можно сформулировать несколько важных промежуточных выводов.

Во-первых, инструменты используемые отечественными автопроизводителями в своей базе заточены на жесткую инженерную кодификацию отклонений поступающих в виде строгих кодов дефектов, отклонения в виде жалоб рассматривать в рамках принятой у нас системы кодификации просто не возможно, она не приемлет достаточно вольной трактовки дефектов, которая возможна при описании со стороны потребителя. В системе кодификации наших предприятий нет функции посредника обеспечивающего связь (рисунок 2), также как и нет голоса потребителя. Поэтому услышать голос клиента инженерными службами наших автосборочных предприятий по-прежнему проблема довольно сложная.

Во-вторых, чисто на организационном уровне на наших предприятиях анализом дефектов занимаются специалисты службы качества, а анализом удовлетворенности потребителей занимается служба маркетинга, что в как показывает совместный анализ отечественного и зарубежного опыта, в корне не верно. Получается что часто суть потребительских вопросов одна и та же. Но служба качества видит только проблемы с дефектами, а служба маркетинга видит проблемы с удовлетворенностью, и для того чтобы совместить эти вопросы на один лист требуется хороший уровень организационной синхронизации, а это тоже является значимой проблемой наших предприятий.

Для организации деятельности направленной на мониторинг удовлетворенности потребителей воспринимаемым качеством автомобилей в эксплуатации требуется разработка комплексных инструментов обеспечивающих не только решение научно-технической задачи по созданию соответствующего кодификатора, также требуется решить задачу организационного уровня, связанную с модернизацией структур и обязанностей функциональных подразделений занимающихся аналитической деятельностью, вопросами развития кодификатора и инструментов мониторинга, подготавливающих управленческие решения в области качества продукции.

Рассмотрим этапы деятельности предприятия сервисной сети иностранного автопроизводителя по формированию данных направляемых в корпоративный центр и отражающих информацию касающуюся качества автомобилей в эксплуатации (рисунок 3).

а ***б***

Рис. 3. Графическая интерпретация деятельности предприятия фирменного автосервиса при передаче данных о качестве автомобилей в корпоративную службу качества автопроизводителя

Анализ данных представленных на рисунке 3 показывает, что процессы передачи данных о качестве продукции разнесены по двум программам. Первая программа ICM определяет информационную базу, куда вносятся жалобы потребителей к качеству автомобилей, соответствующие дефекты автомобилей. Здесь формируется заказ – наряд на гарантийный и постгарантийный ремонт автомобилей, а также готовятся документы по проведению работ по техническому обслуживанию и выполнению особых технических операций, связанных с реализацией отзывных кампаний. Вторая программа GCM, для нас представляет наибольший интерес (рисунок 3 б), поскольку именно через ее реализацию информация передается в корпоративные центры мониторинга и управления качеством автопроизводителя. Как видно из рисунка именно в эту программу вводятся подтвержденные дефекты автомобилей, с дополнением в виде возможной корректировки, и валидацией результатов внесения данных. Здесь же мы видим косвенное подтверждение сделанному ранее предположению, о модульности структуры кодификатора и участия инженерных подразделений в анализе качества продукции.

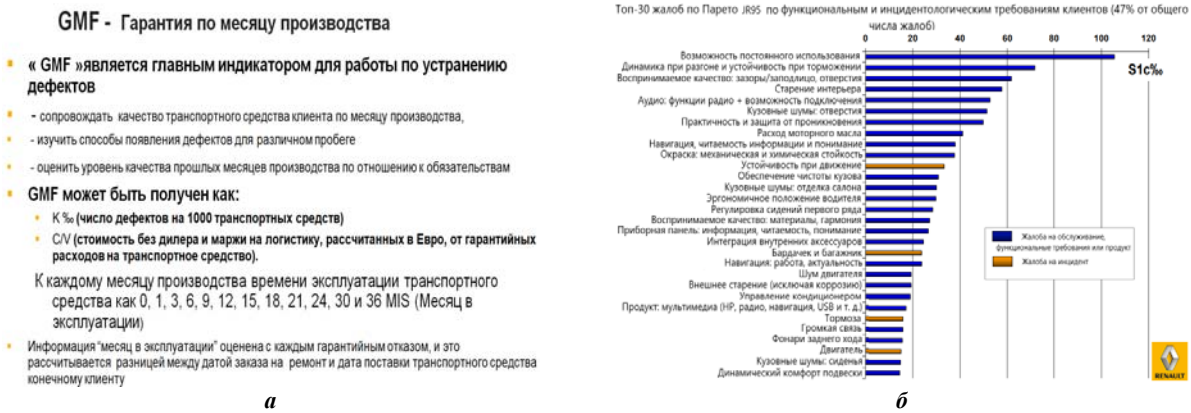
Электронные окна программ обеспечивающих формирования акта обслуживания автомобиля представлены на рисунке 4. Здесь представлено стандартное окно кодирования дефектов (подтвержденных, не подтвержденных в гарантии), а также дополнительные коды стандартного протокола кодирования.

а *б*

Рис. 4. Электронные окна программы кодирования дефектов автомобилей иностранного производства

Также как и в случае анализа сложившейся практики отечественных автопроизводителей, переходим к исследованию количественных индикаторов и отчетов по мониторингу качества автомобилей в эксплуатации иностранного производства.

На рисунке 5 (а) представлена информация об основном количественном индикаторе, используемом в компании Renault для мониторинга дефектности автомобилей в эксплуатации. На рисунке 5 (б) представлены данные отражающие результаты мониторинга дефектности новых автомобилей в эксплуатации.



а *б*

Рис. 5. Графическое описание основного количественного индикатора мониторинга качества (а) и диаграмма

Парето по результатам мониторинга по уровню жалоб потребителей к качеству новых автомобилей. Анализ информации, представленной на рисунке 5 а, показывает, что в настоящее время иностранные и отечественные автосборочные предприятия в качестве количественных индексов качества продукции в эксплуатации используют одинаковые показатели. Это с одной стороны открывает возможность для проведения совместных бенчаркинговых исследований автомобилей разных брендов с точки зрения показателей качества. С другой стороны (рисунок 5 б), мы видим, что в отечественной практике отсутствует возможность сопоставления информации, отражающей дефектность и жалобы потребителей на продукцию в рамках применения единого инструментария. Для нашей текущей практики, получение диаграммы, представленной на рисунке 5 б – проблематично. В международной корпорации используется обобщающий индикатор S1c‰, который отражает общий уровень жалоб потребителей к качеству

и соответствующую дефектность (инцидентология) продукции, но при этом источником информации для расчета S1c‰ выступают исходники информационной базы ICM. То есть важным преимуществом такого построения работы является то, что при приемке автомобиля в автосервисе, записываются и заносятся в информационную базу все жалобы потребителя, и только после того как подтверждается часть из них в виде выявленных дефектов, проводится их регистрация в гарантийной программе. Обладая информацией о жалобах и информацией о дефектах, у специалистов службы качества автопроизводителя появляется возможность для совместного рассмотрения данных, представления их в виде причинно-следственной формы. Такое восприятие информации потребителя, ее трансформация в технический язык несомненно дополняет и обогащает понимание автопроизводителя.

Важным аспектом, который также нуждается в выделении, является то, что проводя анализ диаграмм отчетов используемых отечественным производителем легковых автомобилей и отчетов отечественного производителя грузовых автомобилей мы не можем оперировать данными отражающими уровень жалоб потребителей к качеству продукции. Здесь используется довольно строгий язык кодов дефектов отражающих уникальный номер узлов, деталей замененных или отремонтированных в процессе обслуживания автомобиля. А если присмотреться к данным диаграммы представленным на рисунке 5 б, то можно заметить что доля проблем автомобилей связанная с инцидентами (дефектами) не такая уж большая в сравнении с жалобами потребителей по техническим аспектам качества. Что же получается? А получается то, что отечественные автопроизводители не всегда видят реальную картину качества по своим продуктам, они ориентируются лишь на малую часть информации отражающей проблемные стороны продукции.

По результатам рассмотрения теории и практики деятельности по организации деятельности направленной на сбор, обработку и анализ данных отражающих качество автомобилей в эксплуатации можно выделить достоинства и недостатки в этом вопросе свойственные отечественным и иностранным автопроизводителям:

- традиционно сильной стороной отечественных автопроизводителей является высокий уровень технической детализации в описании дефектов в виде кодов неисправности. Следствием этого является высокая точность идентификации технических проблем качества приведших к поломке. Это обеспечивает значительное упрощение деятельности предприятия в части решения задач по устранению выявленных дефектов, поскольку дефектные детали выделяются практически сразу на этапе диагностики на предприятиях фирменного автосервиса. Получается что высокий уровень детализации и наполненности кодификатора дефектов, соответствующими кодами, дает автопроизводителю важное преимущество заключающееся в возможности работать с выявленными дефектами практически сразу после их регистрации в актах гарантийного обслуживания;

- в отличие от отечественной практики, иностранные автопроизводители в вопросах организации деятельности и формирования кодификаторов дефектов автомобилей отталкиваются от потребительских ощущений при использовании автотранспортного средства. В этом есть и достоинство и недостаток по отношению к отечественной практике. Неоспоримым достоинством такого подхода является то, что в своей деятельности иностранные автопроизводители используют более широкие границы в определении недостатков продукции уже на стадии обслуживания и ремонта на предприятиях фирменного автосервиса. Представители автосервиса фиксируют со слов потребителей все волнующие его вопросы в части эксплуатации автомобилей и заносят эти вопросы в специализированную базу данных, которую видит автопроизводитель. Далее проблемы подтверждаемые по условиям гарантийных обязательств или коммерческих условий, устраняются и вносятся в соответствующие акту облуживания. При этом не теряется и качественный объем потребительской информации. Это для автопроизводителя создает дополнительные возможности для оценки потребительских качеств продукции и с точки зрения поломок автомобилей и сточки зрения жалоб потребителей. Но при этом очевидным недостатком иностранной практики ведения деятельности является отсутствие такого жестко детализированного инженерного подхода в кодификации проблем качества, который свойственен отечественной практике. Соответственно требуются дополнительные функциональные и инженерные фильтры для того чтобы эффективно решать задачи по однозначно правильной идентификации технической проблемы качества новых автомобилей в эксплуатации.

- актуальной научно-технической задачей становится решение проблемы связанной с разработкой инструментария кодификации несоответствий продукции, жалоб потребителей и организации работы по мониторингу и управлению качеством на автосборочных предприятиях, нивелирующих выделенные недостатки, и соответственно, ориентированные на наиболее полное использование достоинств отечественной и иностранной науки и практики.

Список литературы

1. Kozlovskiy V. Analytical models of mass media as a method of quality management in the automotive industry / V. Kozlovskiy, D. Aydarov // Quality - Access to Success. 2017. Т. 18. № 160. С. 83-87.

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. Козловский В.Н. Цифровая среда поддержки управления конкурентоспособностью / В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, Д.И. Панюков, М.М. Васильев // Стандарты и качество. 2018. № 6. С. 86-89.

4. 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.

5. Козловский В.Н. Аналитический комплекс прогнозирования надежности электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой / В.Н. Козловский, Н.И. Горбачевский, А.Г. Сорокин, В.Б. Кислинский, Л.Х. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 3. С. 227-229.

6. Панюков Д.И. Проектирование новых производственных процессов / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Г.Г. Слистина // Стандарты и качество. 2014. № 11. С. 92-95.

Антонова Наталья Алексеевна, аспирант, vera1967.antonova@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,

Клентак Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент, anna_klentak@mail.ru, Россия, Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

REVIEW OF BEST EXPERIENCE IN SOLVING THE PROBLEM OF CODIFICATION OF VEHICLE DEFECTS IN OPERATION

N.A. Antonova, V.N. Kozlovsky, A.S. Klentak

The article presents the results of a study of the experience of leaders of global automotive production in solving the problem of organizing the process of codifying car defects during operation

Key words: competitiveness, quality, automotive industry, codification of defects, operation

Antonova Natalya Alekseevna, postgraduate, vera1967.antonova@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,

Klentak Anna Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, anna_klentak@mail.ru, Russia, Samara, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University)

УДК 621.9.08
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-521-522

ИЗМЕРЕНИЕ ТИПОВЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КИМ

С.М. Никольский

В настоящей статье рассмотрены основные 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.

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 ему необходимо измерять такие типовые геометрические элементы как: - точка, плоскость, окружность, конус, цилиндр, сфера и т.д. В данной статье рассмотрены основные особенности измерения некоторых элементов при помощи КИМ.

Измерения геометрических 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.

Окружность. При измерении окружности задается траектория (рисунок 1), которая регулируется в зависимости от поставленной задачи.

В том случае, если при измерении окружности на измерительном пути встречается препятствие, например паз, то путь может быть отредактирован, в соответствии с особенностями измеряемого элемента (рисунок 2).

Плоскость. В отличии от окружности, при измерении плоскости в автоматическом режиме, у оператора существует возможность выбора стратегии зондирования (типа распределения точек на измеряемой поверхности).

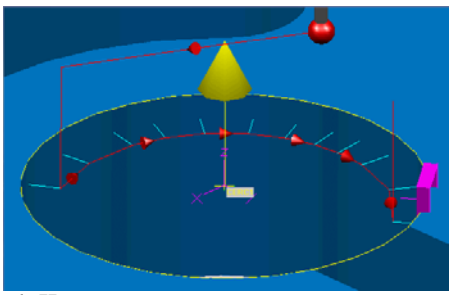


Рис. 1. Измерительная траектория окружности

П-образная измерительная траектория (рисунок 3) применяется при измерении как больших, так и малых плоскостей. Изменяя шаг и количество точек можно добиться нужного объема получаемого измерительной информации.

Для измерения плоскостей, имеющих форму круга существует круговое распределение точек контакта (рисунок 4).

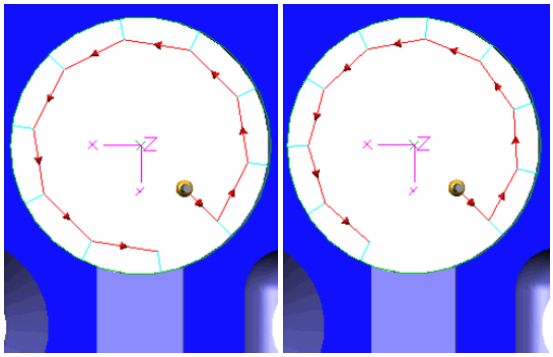


Рис. 2. Редактирование измерительного пути окружности

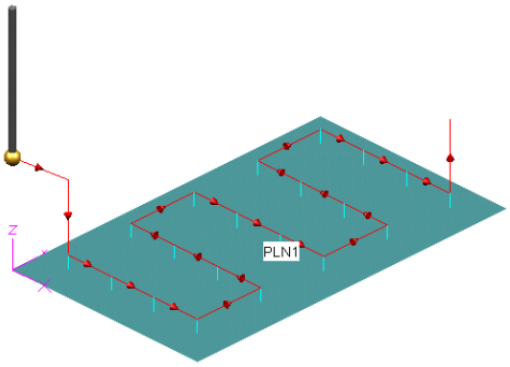


Рис. 3. П-образная измерительная траектория при измерении плоскости

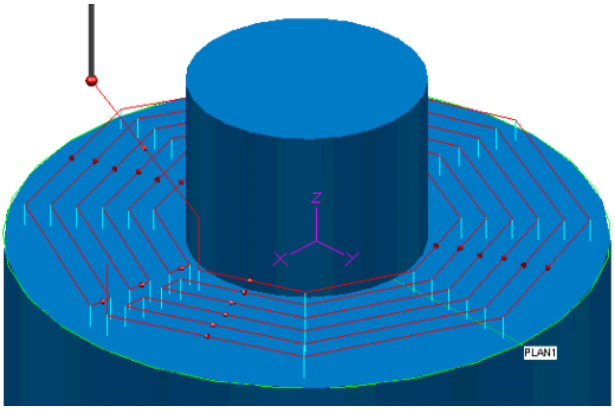


Рис. 4. Круговая измерительная траектория при измерении плоскости

Цилиндр. Под цилиндром принято считать глубокое отверстие, измерение которого проводится по нескольким сечениям, в зависимости от глубины. При измерении в автоматическом режиме, оператор может выбрать количество сечений, т.е. глубину контроля отверстия и количество точек в каждом из них (рисунок 5).

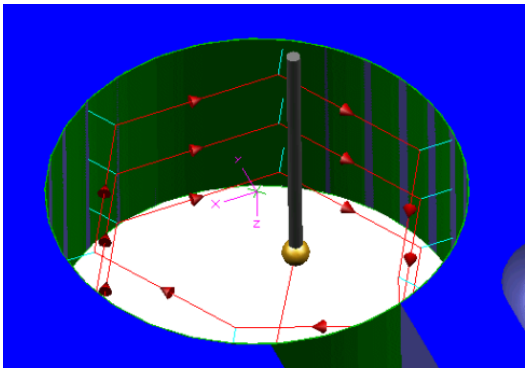


Рис. 5. Измерительная траектория при измерении цилиндра

Наличие такой функции в КИМ, как измерение в автоматическом режиме, позволяет минимизировать влияния погрешностей, вызванных неправильном подобранным методом измерений [1, 2].

Список литературы

1. Никольский С.М. Исследование влияния количества калибровочных точек на результат измерений с применением КИМ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 9. С. 380-385.

2. Никольский С.М., Соловьев С.И. Источники погрешностей координатных измерений и способы минимизации их влияния // Вестник науки. 2021. Т. 1. № 6-1 (39). С. 217-224.

Никольский Сергей Михайлович, инженер по метрологии, nikolsky.serge@yandex.ru, Россия, Тула, АО «АК «Туламашзавод»

MEASUREMENT OF TYPICAL GEOMETRIC ELEMENTS ON THE CMM

S.M. Nikolsky

In this article, the main geometric elements that are subject to control on the CMM are considered. An overview of two measurement modes, their special features and capabilities is performed. Examples of performing measurements of some geometric elements using CMM are considered.

Key words: CMM, measurements, automatic mode, points, sections, geometric elements.

Nikolsky Sergey Mikhailovich, metrology engineer, nikolsky.serge@yandex.ru, Russia, Tula, JSC «Tulamashzavod»

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 658.531
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-524-525

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТРУДОЕМКОСТИ НИОКР

С.С. Воронин, К.С. Касаркин, В.А Третьякова

В рамках данного исследования рассмотрены существующие методики определения трудоемкости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также выявлены их недостатки. С целью их устранения предложено внедрение искусственного интеллекта в процесс оценки трудоемкости НИОКР, а именно, нейронных сетей, в основе функционирования которых будет лежать модель множественной регрессии. Помимо этого, рассмотрен вариант применения текстовой нейронной сети для обработки данных, полученных от сотрудников, занимающихся НИОКР. И как итоговый результат описана общая схема функционирования системы.

Ключевые слова: научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа, трудоемкость, нормативы, планирование, нейронная сеть, искусственный интеллект, множественная регрессия.

Вопрос автоматизации и цифровизации промышленности со временем становится лишь актуальнее. В России проводится политика, направленная на сокращение отставания от мировых лидеров и обретению независимости от импорта цифровых технологий. Цифровая трансформация определена как одна из национальных целей, и на ее реализацию выделяется особая финансовая поддержка [1].

Еще один фактор, стимулирующий внедрение и развитие технологий в промышленной индустрии, – это усложнение бизнес-процессов на предприятиях. Производство постоянно модернизируется, и современные инструменты из различных областей технологий, которые формируют так называемую «промышленность 4.0», позволяют повышать эффективность на всех его этапах [2].

Определяющее значение в развитии экономики России оказывают предприятия, ведущие инновационную деятельность. Их работа вносит существенный вклад в формирование ВВП страны. Это достигается при условии, если предприятие обладает значительным инновационным потенциалом и поддерживает высокие темпы научно-технического развития, что реализуется за счет научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). Также невозможно без проведения НИОКР развитие промышленности, т. к. именно в рамках этого процесса происходит разработка и модернизация изделий. В 2022 году более 4170 организаций в РФ выполняли научные исследования и разработки [3]. Исходя из этого, можно сделать вывод, что существует устойчивая необходимость расчета сроков и стоимости выполнения НИОКР для эффективной организации их выполнения, а также контроля со стороны заказчика.

В основе организации любого производственного процесса, неотъемлемой частью которого является НИОКР, лежат обоснованные трудоемкости и продолжительность выполнения всех работ. Оценка трудоемкости в контексте НИР и ОКР занимает особое место в организации производства, поскольку она влияет на стратегическое планирование и успешность инновационных проектов. Помимо расчета сроков выполнения работ, за счет оценки трудоемкости возможно обоснование их стоимости [4, 5]. Однако определение трудоемкости при проведении НИОКР обладает рядом нюансов.

Анализ работ [6–8] в области изучения НИОКР позволяет прийти к нескольким выводам. Научно-исследовательская деятельность предполагает высокую степень нерегламентированной творческой, умственной, аналитической работы и риска. Результат научно-исследовательской деятельности непредсказуем, есть большая вероятность того, что в конце будут получены неполные или отрицательные результаты, которые в дальнейшем не будут представлять научной и информационной ценности. При этом на выполнение исследовательских работ будет затрачено большое количество денежных и материальных ресурсов. Все это обуславливает то, что установить трудоемкость НИОКР традиционными методами нормирования т руда очень сложно, т.к. методика должна учитывать ряд параметров таких, как особенность конечных потребителей, масштаба работы, уровня сложности, уникальности разработки, уровня риска и неопределенности и др.

В настоящее время известны различные методики по определению трудоемкости НИОКР. Зачастую при нормировании НИОКР используются разновидности опытно-статистического метода [9-11]:

- метод структурной аналогии предполагает, что ожидаемая трудоемкость определяется с помощью сравнения по трудоемкости выделенных сборочных единиц с аналогом.

Формула для расчета трудоемкости:

$$T_{\text{н}} = \sum_1^n \mathrm{T}_i, \quad (1)$$

где $\sum_1^n \mathrm{T}_i$ – это суммарная трудоемкость разработки отдельных аналогичных этапов.

- метод переводных коэффициентов, которые устанавливаются экспертами в совокупности с разработчиками и отражают в себе степень новизны и изменение условий исследований и разработок.

Формула для расчета трудоемкости:

$$T_{\text{н}} = \text{Т}_{\text{аналог}} * \text{К}_{\text{перевода}}, \quad (2)$$

где $\text{Т}_{\text{аналог}}$ – трудоемкость аналогичного изделия и работы; $\text{К}_{\text{перевода}}$ – переводной коэффициент.

- метод типовых этапов и видов работ. Существует типовой процесс проведения НИОКР, который содержит в себе определенные виды работ. На основании этих типовых работ определяется ожидаемая трудоемкость.

Формула для расчета трудоемкости:

$$T_{\text{н}} = \sum_1^n t_p, \quad (3)$$

где t_p – это трудоемкости обязательных видов работ, входящих в НИОКР, n – это количество видов работ.

Применение подобных методов имеет целый ряд недостатков. Во-первых, при расчете трудоемкости по данным формулам происходит множество упущений. Большинство специфических факторов, возникающих при проведении НИОКР пытаются учесть с помощью разного рода коэффициентов. Однако выполнение их расчета вручную влечет за собой появление неточностей, которые могут усиливаться ввиду применения экспертного подхода в некоторых из методик. Помимо этого, проведение самих расчетов является достаточно трудоемким процессом и влечет за собой лишние трудозатраты среди сотрудников.

В силу перечисленных факторов нынешние нормативные документы на предприятиях, ведущих научную деятельность, зачастую допускают отклонения трудоемкости в значительных интервалах. Отклонения между крайними значениями могут составлять до 100%, что в значительной степени может затруднять процесс обоснования выбора значения трудоемкости на работу и, следовательно, планирования этих работ. Иногда данные документы являются попросту устаревшими.

Поэтому возникает потребность в наличии актуальной нормативной базы для нормирования НИОКР. Этапы по разработке подобного рода базы были описаны в работе [12], но «разработка функционирования нормативной базы» заслуживает более подробного описания.

Как было сказано ранее, НИОКР обладают особой спецификой, подстроиться под которую возможно, применяя передовые цифровые решения. Один из таких инструментов, который на данный момент выходит на пик своей популярности, – машинное обучение и нейронные сети. Системы, функционирующие с использованием нейронных сетей способны подстраиваться под бизнес-процессы предприятия, учитывая их всевозможные особенности. Они могут быть применимы для широкого спектра задач, таких как прогнозирование, планирование, кластеризация, проектирование автоматизированных систем управления, управление качеством и т. д. [13]. В данной работе остановимся на следующих двух аспектах: прогнозирование и планирование.

Осуществлять планирование процессов можно различными методами, в данном исследовании будет затронут нормативный. В таком случае трудоемкость работ по всем фазам и стадиям инновационного процесса определяется на основе нормативов, имеющихся на предприятии, и справочных данных о затратах труда в прошлых периодах [14].

В силу упомянутых ранее недостатков существующих на предприятиях нормативных документов опираться на них при планировании будет нерационально. Тогда первоочередной задачей системы становится сбор актуальной информации касательно трудоемкости процессов НИОКР на предприятии. На первой фазе ее функционирования синтезируется база данных обучающих примеров, представляющих собой пары «вход» (оценки факторов, влияющих на трудоемкость) и «выход» (фактическая трудоемкость этапа), которые вносятся сотрудниками до и после окончания этапа соответственно. С помощью сформированных примеров осуществляется процесс обучения, в ходе которого нейронная сеть выявляет сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполняет их обобщение. Необходимо отметить, что потребуется достаточно обширная база обучающих данных, и ее формирование займет определенное количество времени. Однако полученная информация обладает значительной ценностью, так как ложится в основу обновленных нормативов предприятия, а также позволяет осуществлять планирование проведения дальнейших НИОКР с помощью прогнозирования их трудоемкости.

На рисунке 1 представим принципиальную схему функционирования системы после ее обучения, в основе которой будет использована концепция «черного ящика».

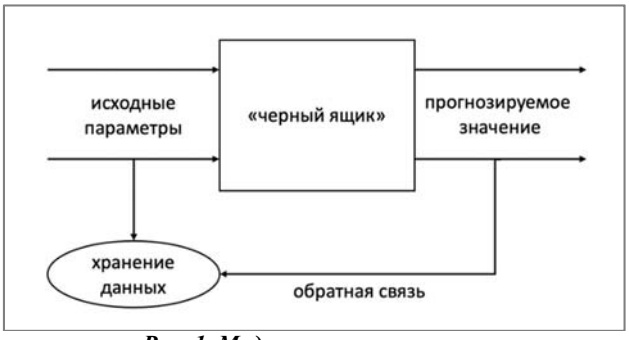


Рис. 1. Модель «черного ящика»

Далее подробнее разберем, что из себя представляет каждый элемент представленной структуры.

В основе работы данной системы («черного ящика») будет лежать применение упомянутых ранее нейронных сетей. Во-первых, по-прежнему будет вестись сбор информации для уточнения нормативной базы и дообучения нейронной сети. Во-вторых, будет осуществляться прогнозирование длительности выполнения этапов: нейронная сеть позволит преобразовать определенный набор переменных в искомую переменную с достаточно высокой точностью.

В качестве исходных параметров будут использоваться факторы, влияющие на длительность этапа:

– количество и квалификация исполнителей;

– уровень сложности решаемой задачи;

– инновационный уровень проводимых работ и исследований;
– наличие готовых методов и методик по аналогичным задачам;
– наличие близких прототипов и аналогов реальных процессов и объектов;
– объем необходимой технической документации;
– количество проводимых испытаний;
– интенсивность проводимой работы и др.

Информация по каждому входному параметру должна быть занесена сотрудником в исходную форму системы. На выходе предполагается получить искомую переменную, которой в данном случае будет являться прогнозируемая длительность выполнения соответствующего этапа. А введенные данные будут сохранены для дальнейшего обучения системы и формирования нормативной базы.

В основе функционирования используемой нейронной сети предположительно будет использована модель множественной регрессии [15], так как будет рассмотрено более одного предиктора. Опишем основы действия данной модели и взаимосвязь с поставленными задачами.

Общее уравнение множественной линейной регрессии имеет вид:

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_n), \quad (4)$$

где y – зависимая переменная, которая подлежит прогнозированию (в нашем случае – длительность выполнения рассматриваемого этапа НИОКР); x_i – независимые переменные (предикторы), способные объяснить y (факторы, влияющие на длительность выполнения этапа).

Сложность состоит в том, что конкретный вид данной функции не известен. Преимущество использования нейронной сети как раз и заключается в том, что отпадает необходимость выявления данной зависимости вручную, т. к. это будет происходить автоматически.

Отдельное внимание уделим сбору и обработке обратной связи. После окончания этапа следует сравнить спрогнозированное и фактическое значения длительности выполнения работ. Оценка точности прогноза [16] определяется через ошибку прогнозирования. Её можно определить с помощью различных параметров, которые приведем далее.

Средняя абсолютная ошибка (MAE). Метрика измеряет среднюю сумму абсолютной разницы между фактическим значением и прогнозируемым значением.

Формула для средней абсолютной ошибки:

$$MAE = \sum_{t=1}^{n} \frac{|T_{\text{факт}} - T_{\text{прогноз}}|}{n}, \quad (5)$$

где $T_{\text{факт}}$– фактическое значение трудоемкости, полученное в результате проведения этапа; $T_{\text{прогноз}}$ – спрогнозированное значение трудоемкости этапа; n – число периодов, для которых осуществлен прогноз.

Среднеквадратическая ошибка (MSE). Измеряет среднюю сумму квадратной разности между фактическим значением и прогнозируемым значением для всех точек данных. Чем меньше MSE, тем точнее предсказание.

Формула для среднеквадратической ошибки:

$$MSE = \sum_{t=1}^{n} \frac{(T_{\text{факт}} - T_{\text{прогноз}})^2}{n}, \quad (6)$$

где $T_{\text{факт}}$– фактическое значение трудоемкости, полученное в результате проведения этапа; $T_{\text{прогноз}}$ – спрогнозированное значение трудоемкости этапа; n – число периодов, для которых осуществлен прогноз.

Расчет данных метрик осуществляется автоматически без непосредственного участия сотрудников.

С помощью расчета различных статистических показателей можно узнать величину отклонений, но самое главное выявить также их причину. Для этого необходимо ввести открытую форму для сбора обратной связи, в которой работник после окончания этапа имеет возможность изложить особенности протекания работ и указать дополнительные факторы, которые не были внесены перед выполнением этапа, но также могли повлиять на его продолжительность. Для обработки полученной текстовой информации стоит снова прибегнуть к использованию искусственного интеллекта, а именно текстовой нейронной сети [17]. В частности, может подойти алгоритм обработки естественного языка Generative Pre-trained Transformer (GPT) [18]. Это необходимо для того, чтобы интерпретировать текст, написанный сотрудником, с высокой степенью точности и входе дальнейших преобразований установить зависимости между описанными исполнителем факторами и отклонениями в длительности проведения этапа НИОКР.

Помимо этого, стоит обратить внимание на то, что многие этапы НИОКР выполняются в соответствии с различными документами. Согласно методике, описанной в статье [12], в качестве фиксажных точек [19] может выступать факт утверждения соответственного документа, например, непосредственно проведение ОКР начинается после получения технического задания, подписанного заказчиком, а заканчивается подписание конструкторских и технологических документов. Исходя из этого, целесообразно также доработать рассматриваемую систему путем подключения к ней модуля электронного документа оборота (ЭДО). При подписании соответствующего документа в ЭДО должен происходить переход к новому этапу НИОКР или же завершение текущего.

В данный моменты существует множество low-code платформ [20], в которые уже интегрированы различные нейронные сети и модули ЭДО. Это позволит значительно упростить внедрение системы на предприятии. Подключение к такой модели большого количества организаций, ведущих научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, позволит выявлять более сложные зависимости между входными и выходными данными, а также повысить точность прогнозируемого результата. Нейронная сеть должна постоянно дообучаться, а это возможно при наличии определенного объема данных.

Ограничением в создании такой единой системы может являться вопрос обеспечения конфиденциальности предоставления данных и хранения информации, т.к. большинство производственных предприятий, занимающихся НИОКР могут входить в ОПК или быть закрытыми. В этом случае каждому предприятию целесообразно использовать свою собственную систему оценки трудоемкости НИОКР, тем более что точность такой системы будет выше ввиду однотипности выполняемых научных исследований.

Обобщив приведенную выше информацию, проиллюстрируем описанные процессы по функционированию системы на рисунке 2.

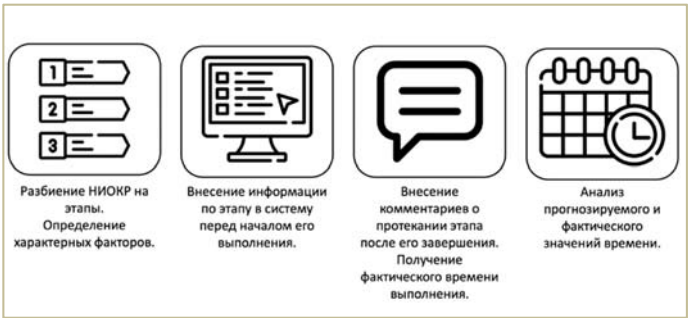


Рис. 2. Схема функционирования системы

Из данной схемы видно, что от работника требуется только заполнение форм, и это не влечет за собой больших трудозатрат, тем самым, делая систему максимально практико-ориентированной для применения на предприятиях.

Внедрение данной системы позволит решить целый ряд проблем, связанных с нормированием НИОКР. Подход с использованием автоматизированного построения математических зависимостей позволит значительно увеличить точность нормативов на предприятиях, ведущих научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Помимо этого, данная система поможет учесть особенности проведения НИОКР такие, как высокая доля умственного труда, сложность решаемых задач, неопределенность результата и т. д. Сбор информации касательно протекания каждого этапа поспособствует выявлению причин потерь рабочего времени для их дальнейшего сокращения или устранения.

Список литературы

1.Указ Президента Российской Федерации от 02.03.2022 № 83 "О мерах по обеспечению ускоренного развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации".

2.Истомина Е.А. Оценка трендов цифровизации в промышленности // Вестник Челябинского государственного университета. 2018. № 12(422). С. 108–116.

3.Официальная статистика: Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] URL: https://rosstat.gov.ru/folder/10705 (дата обращения: 25.10.2023)

4.Туккель И.Л. Т81 Управление инновационными проектами: учебник / И. Л. Туккель, А. В. Сурина, Н. Б. Культин / Под ред. И. Л. Туккеля. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.

5.Третьякова В.А., Васина О.В., Доронина Е.Д., Лебедев Г.А. Оценка возможности реализации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на предприятии // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 11-2. С. 296-300.

6.Юрлов Ф.Ф. Инновации и прогнозирование развития инвестиционной деятельности: монография / Ф. Ф. Юрлов, Е. И. Шапкин, А. А. Разина. Н. Новгород: НГТУ, 2009. 200 с.

7.Юрлов Ф.Ф. Многокритериальная оценка экономического состояния и инновационной деятельности промышленных предприятий / Ф. Ф. Юрлов, С. Н. Яшина, Д. Н. Лапаев, А. Ф. Плеханова. Н. Новгород: НГТУ, 2009. 192 с.

8.Пузыня К.Ф. Экономическая эффективность научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в машиностроении / К. Ф. Пузыня, А. С. Запаснюк. Л.: Машиностроение. Ленинг. отдел., 1978. 304 с.

9.Жариков А.В. Методы нормирования труда в инновационной деятельности / А. В. Жариков, Ю. С. Ширяева, О. А. Бодрикова. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2013. №3 (3). С. 88–92.

10. Лапаев Д.Н. Организация НИОКР: учеб. пособие/ Д. Н. Лапаев [и др.]; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р. Е. Алексеева. Н. Новгород, 2017. 15 с.

11. Методические рекомендации по нормированию труда на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (утв. ФГБУ НИИ ТСС Минтруда России 07.03.2014 N 006).

12. Воронин С.С., Касаркин К.С., Третьякова В.А. Этапы разработки нормативной базы для нормирования НИОКР // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. № 7(101). С. 20–25.

13. Мызникова Т.Н., Бажанова М.И., Белов М. В. Внедрение системы управленческого учёта и контроллинга на промышленном предприятии // Вестник ЮУрГУ. Сер. Экономика и менеджмент. 2020. Т. 14, № 2. С. 119–128. DOI: 10.14529/em200211.

14. Ганина Г.Э. Управление инновационными проектами: учеб. пособие / Ганина Г. Э., Клементьева С. В.; МГТУ им. Н. Э. Баумана. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 36 с.

15. Бойко Т.А. Разработка алгоритма построения модели множественной линейной регрессии // Экономика и управление: проблемы, решения. 2018. Т. 8, № 12. С. 113–119. EDN YUVRRR.

16. Али М.А. Исследование точности прогнозирования случайного процесса на базе нейронных сетей //Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2006. №. 11. С. 144–148.

17. Краковский И.В., Асалханов П.Г. Текстовые нейронные сети: возможности, применение и перспективы развития // ББК 40 Н 347. 2023. С. 262.

18. Кумратова А.М. и др. Анализ возможностей нейронной сети на основе языковой модели GPT-3 и способы ее применения на производстве // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2023. №. 1 (316). С. 80–85.

19. Борисевич И.В., Глубокий С.В. Аналитически-исследовательский метод нормирования труда // Минск: БНТУ. 2008.

20. Bock A.C., Frank U. Low-code platform //Business & Information Systems Engineering. 2021. Т. 63. С. 733-740.

Воронин Степан Станиславович, студент, voronin.7s4@yandex.ru, Россия, Москва, Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана,

Касаркин Константин Сергеевич, студент, kasarkinkonstantin@gmail.com, Россия, Москва, Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана,

Третьякова Виктория Александровна, канд. техн. наук, доцент, tva@bmstu.ru, Россия, Москва, Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана

DEVELOPMENT OF PRINCIPLES OF NORMATIVE BASE FORMATION FOR ESTIMATION OF LABOR INTENSITY OF R&D

S.S. Voronin, K.S. Kasarkin, V.A. Tretyakova

Within the framework of this research the existing methods of determining the labor intensity of research and development works are considered, and their shortcomings are revealed. In order to eliminate them, the introduction of artificial intelligence in the process of assessing the labor intensity of R&D is proposed, namely, neural networks, the functioning of which will be based on the model of multiple regression. In addition, the variant of application of text neural network for processing of data received from employees engaged in R&D is considered. And as a final result the general scheme of system functioning is described.

Key words: research and development work, labor intensity, standards, planning, neural network, artificial intelligence, multiple regression.

Voronin Stepan Stanislavovich, student, voronin.7s4@yandex.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University,

Kasarkin Konstantin Sergeevich, student, kasarkinkonstantin@gmail.com, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University,

Tretyakova Victoria Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent, tva@bmstu.ru, Russia, Moscow, Bauman Moscow State Technical University

УДК 004.45:62-52
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-528-529

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

М.В. Чугунов, И.Н. Полунина, И.А. Ермишов

В статье представлены интегрированные виртуальные (CAx) и натурные модели транспортной платформы мобильного робота. Модели выполнены в разном масштабе, что упрощает решение частных задач анализа проектных решений. Основным инструментом интеграции моделей разного типа является единая система управления. Необходимые параметры несущей системы, ходовой части, электро- и сервоприводов определяются на основе численных и натурных экспериментов.

Ключевые слова: мобильный робот, транспортная платформа, натурные, виртуальные и интегрированные модели, натурный и численный эксперимент.

Проект транспортной платформы для автономного мобильного робота, включая несущую систему, ходовую часть, систему торможения и управления реализуется в виде интегрированных натурных и CAx-моделей, предусматривающих анализ и оптимизацию проектных решений. CAx-модели формируются в базовой CAx-среде (SolidWorks) с использованием разработанного в рамках проекта программного обеспечения, расширяющего и дополняющего штатный функционал базовой системы в части задач синхронного управления мобильным роботом (физическим объектом) и его виртуальной CAx-моделью, что является основным инструментом интеграции моделей разных типов.

В силу того, что задача анализа проектных решений является многодисциплинарной, целесообразно разработать модели в разном масштабе. Так, например, решение задач в терминах теоретической механики и механики деформируемого твердого тела требует использование моделей в масштабе, приближающем модель по основным своим параметрам к реальным промышленным мобильным системам. В то же время для решения задач разработки и отладки алгоритмов траекторного управления удобно использовать модели меньшего масштаба.

В данной работе для построения модели масштаба 1:4 используется самокат KuGoo (рис. 1). Основные компоненты самоката: мотор-колесо (350 кВт) как движитель с универсальным транспортным контроллером, аккумулятор, бортовой компьютер, рулевое колесо с рулевой колонкой и вилкой, корпус-дека.

В процессе проектирования мобильного робота на данной базе необходимо определиться с концепцией построения программно-аппаратной системы управления с максимальным сохранением штатных элементов механики, электроники и программного обеспечения.

В данной работе рассматриваются проектирование программно-аппаратной части мобильной роботизированной платформы, которые развивают опыт кафедры конструкторско-технологической информатики Рузаевского института машиностроения Мордовского государственного университета по разработке интегрированных моделей роботизированных мобильных систем [1-4].

Рис. 1. Штатные компоненты KuGoo

В общепринятой классификации [5, 6] рассматриваемый робот относится к типу 4X2K2Py, т.е. робот имеет два приводных (задних) колеса (движителя) и два передних управляемых колеса. Колесная схема имеет индивидуальный привод для каждого движителя, а каждое из двух рулевых колес имеет свой механизм управления.

Система управления собрана на базе полетного контроллера Pixhawk/APM [7], а в качестве программного обеспечения наземного управления используется ArduPilot MissionPlanner [8].

Из соображений совместимости с Pixhawk штатный транспортный контроллер самоката был заменен нами на контроллер для бесколлекторного мотора zs-x11f-2 мощность 370 Вт, а в качестве сервомоторов рулевого управления мы использовали TZT DC 12V/ 24V DH-03X.

Тестирование данной конструкции дало положительные результаты, обеспечивающие плавное регулирование угловой скоростью приводных колес (рис. 2).

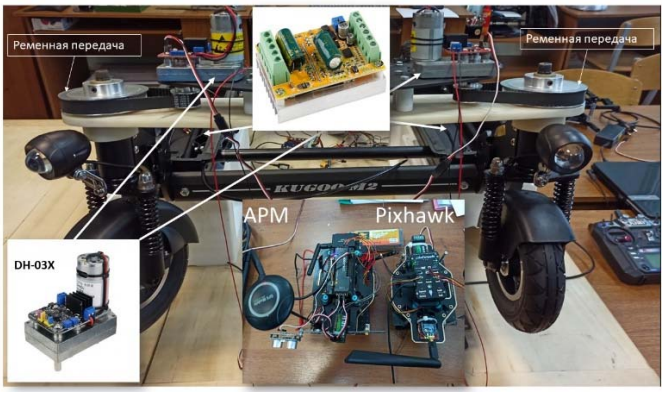


Рис. 2. Система управления на базе APM и Pixhawk в её аппаратной части

На рис. 3 показана принципиальная схема собранного нами лабораторного стенда, совмещенная с проекцией на координатную плоскость 3D-модели робота, по своей структуре соответствующая известной схеме экспериментальных испытаний автомобиля «на беговых барабанах» [9].

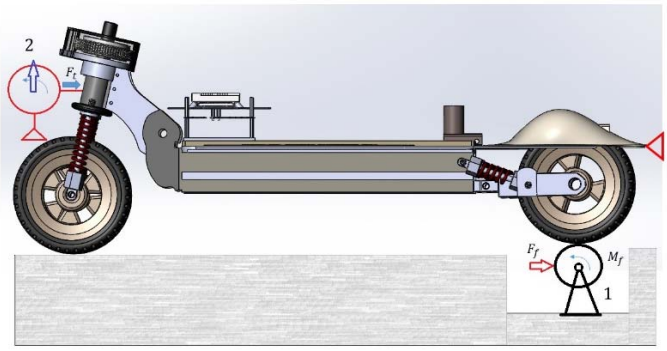


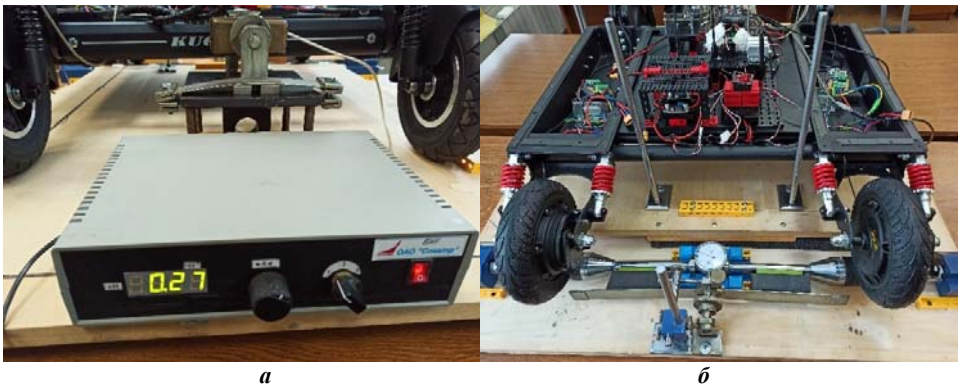
Рис. 3. Принципиальная схема лабораторного стенда

Необходимость сборки такого стенда обусловлена тем, что робот обладает весьма значительной массой, а экспериментальному определению подлежит не только тяговое усилие робота, но и множество параметров настройки контроллера, в частности, те из них, которые обеспечивают плавное трогание с места без проскальзывания и без блокирования моторов (устранение мертвой зоны).

Настройка программно-аппаратного обеспечения производится в наземной станции управления MissionPlanner и требует назначения ряда опций, позволяющих добиться наиболее эффективного управления движением робота. Эти опции определяются как значения переменных, среди которых в качестве основных следует указать следующие [8]: MOT_THR_MIN: минимальное значение газа, MOT_THR_MAX: максимальное значение газа, MOT_SLEWRATE: уровень вращения движителя, соответствующий уровню установленного значения газа в процентах; величина этого параметра, равная 100%, означает достижения полного значения за 1 сек. Адекватное назначение этих опций позволяет также избежать «мертвой зоны» в работе бесколлекторного двигателя мотор-колеса.

Стенд включает в себя опорные валы, свободно вращающиеся в подшипниках, внешние кольца которых зафиксированы на опорах. Опоры заданных размеров распечатаны на 3D-принтере.

На рис. 4 показана натурная (физическая) реализация стенда на базе лабораторного оборудования СМ-1 [10] учебной дисциплины «Сопротивления материалов», включая валы, блок измерения усилий, индикатор часового типа для определения перемещений, стойки, зажимы, опоры, винтовые передачи.



а ***б***

Рис. 4. Натурная (физическая) реализация стенда: а –прижимное устройство, б - динамометр

В задней части стенда установлены беговые валы и система их торможения (рис.4, а). В передней части - электронный динамометр (рис.4, б), который накладывает ограничение на перемещение робота в продольном направлении (вперед) а также, фиксирует тяговое усилие.

Особый интерес представляет момент начала проскальзывания колеса по валу и, соответственно, смена статических сил трения (коэффициентов) на динамические силы трения (коэффициенты). Здесь Ft – тяговое усилие, измеряемое блоком измерения усилий (электронным динамометром). Прижимное устройство барабана обеспечивает плавное торможение барабана и, соответственно постепенное увеличение тягового усилия до максимального, соответствующего установленному уровню газа.

Подбор указанных выше параметров настройки ArduPilot удобнее всего осуществлять на основе проведения экспериментов по определению динамических характеристик робота, а это, в свою очередь, целесообразно реализовать на рассматриваемом лабораторном стенде.

Прижимное устройство (рис.5) с прокладкой из пористой резины, снабженное индикатором часового типа, фиксирующим перемещение прокладки, обеспечивает постепенное увеличение крутящего момента на движителе (мотор-колесе) за счет сил трения между прокладкой и валом. Перемещение прокладки обеспечивается винтовой передачей.

На рис. 6 показан виртуальный аналог лабораторного стенда, представляющий собой полнофункциональную интегрированную CAD/CAE-модель робота, а также результаты измерений усилия с виртуального датчика на пружинах, установленных в продольном направлении между передним бампером робота и жесткой опорой. Таких пружин установлено две симметрично относительно срединной для робота плоскости.

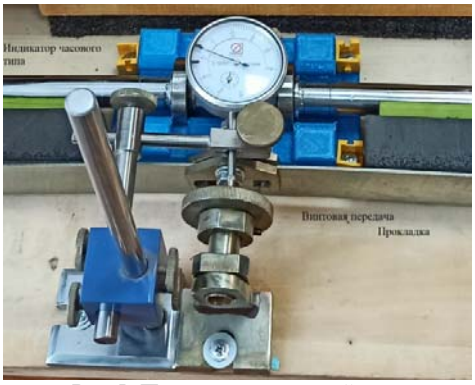


Рис.5. Прижимное устройство

Таким образом, зафиксированную виртуальным датчиком силу сжатия пружины следует увеличить вдвое для определения, развиваемого роботом тягового усилия Ft.

На рис. 6 показаны результаты для виртуальных испытаний по определению крутящего момента и, соответственно, тягового усилия при постепенном их увеличении, т.е. при трогании робота с места и, соответственно, без проскальзывания (пробуксовки).

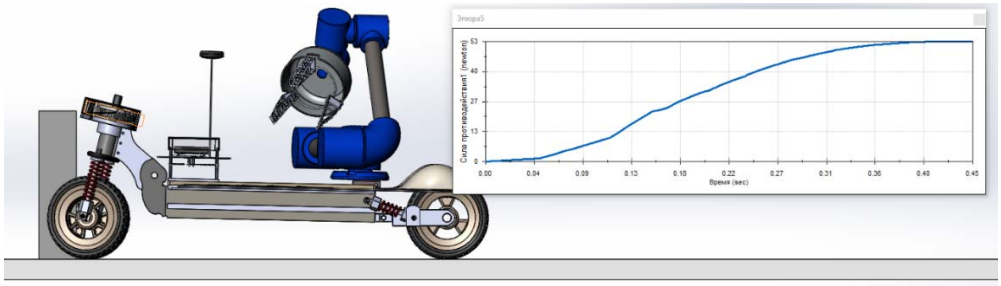


Рис.6. Виртуальная (CAx) модель лабораторного стенда

Сопоставление полученных результатов численных экспериментов с результатами натурных испытании на рассматриваемом стенде на данном этапе испытаний показывает совпадение этих результатов с погрешностью не более 7%.

Драйверы сервомоторов получают ШИМ (PWM) сигнал от контроллера системы траекторного управления и путевой стабилизации робота (рис. 7) и обеспечивают поворот вала мотора на заданный угол. Крутящий момент с вала мотора через ременную передачу передается на вал вилки передней подвески и поворачивает на заданный угол рулевое колесо. Независимое управление каждым из двух рулевых колес обеспечивает лучшую устойчивость и маневренность робота за счет возможности создания угла Аккермана [11].

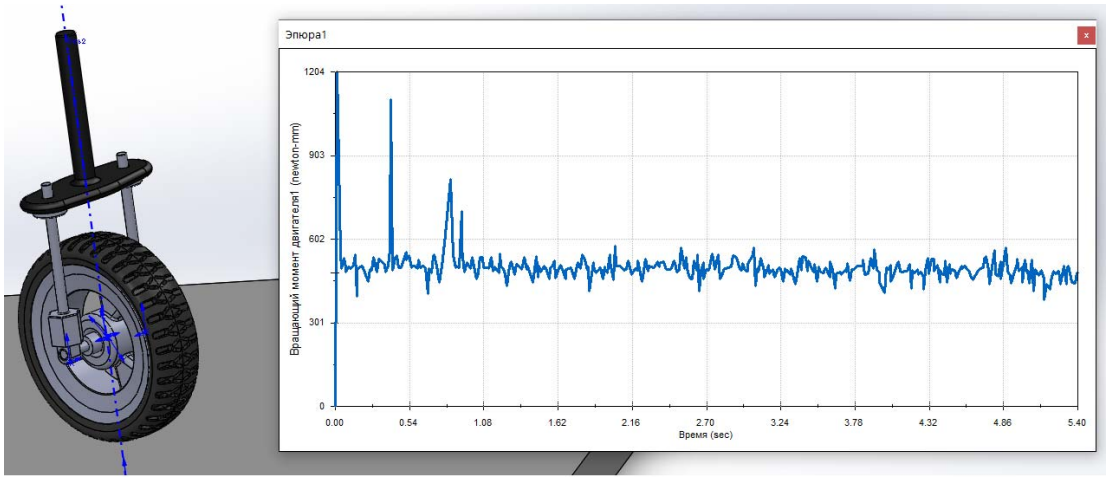


Рис. 7. Результаты расчетов в среде SolidWorks Motion

Одной из ключевых задач проектирования в данной постановке является определение необходимых параметров сервомотора, обеспечивающих эффективность управления. Основным из таких параметров является крутящий момент мотора, зависящий, в свою очередь, от крутящего момента на валу вилки передней подвески, необходимого для поворота колеса в состоянии покоя.

Один из возможных подходов к решению этой задачи основан на использовании известного решения контактной задачи Герца, в частном случае контакта цилиндрического тела с плоскостью [12].

Полуширина полоски контакта для цилиндрических поверхностей радиуса R_1 и R_2 определяется следующим образом:

$$b = 1.128\sqrt{\eta q \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2}} = 1.128\sqrt{\eta q R_1},$$

где q- внешнее давление на единицу длины цилиндра, R_1 – радиус колеса, а

$$\eta = \frac{1-\upsilon_1^2}{E_1} + \frac{1-\upsilon_2^2}{E_2},$$

где E_1 и E_2 - модули Юнга резины (колеса) и бетона (поверхности опирания), υ_1 и υ_2 - коэффициенты Пуассона для те же материалов соответственно.

Величина наибольшего давления между соприкасающимися телами:

$$p = \sqrt{\frac{q}{\eta}\frac{R_1+R_2}{R_1 R_2}} = 0.5642\sqrt{\frac{q}{\eta R_1}}.$$

Полагаем приближенно пятно контакта круглым, а распределение давления в пределах пятна линейным, тогда крутящий момент можно легко определить, как

$$M_k = \int_0^b 2\pi\varrho^2 p(1-\frac{\varrho}{b})\,d\varrho = \frac{\pi p b^3}{6}.$$

Здесь ϱ – радиус вектор произвольной точки в пределах пятна контакта в полярной системе координат с началом в центре рассматриваемого круга.

Расчет по данной методике при полной снаряженной массе робота 160 кг. дает для крутящего момента на валу вилки значение $M_k = 1{,}12$ Н $*$ м.

Для разработанной модели робота был выполнен уточненный расчет в среде SolidWorks (Motion). Результаты данного расчета представлены на рис. 9. Величина максимального пускового момента составила $M_k = 1{,}20$ Н $*$ м.

В результате анализа полученных результатов мы пришли к выводу о том, что выбранные нами драйверы бесколлкторных моторов и сервоприводы обеспечивают требуемые кинематические характеристики робота, а также эффективность управления.

Управление роботом осуществляется по двум каналам, пронумерованным как канал № 1и канал № 3, соответственно, канал № 1 используется для поворота рулевых колес на заданный угол, а канал № 3 – для управления газом (заслонкой). Команды управления реализуются в среде Python Script. Основными функциями являются: Script.SendRC(chan,Value,True) – дать ШИМ сигнал по каналу, где аргументы chan – номер канала, Value – масштабированное значение уровня сигнала; time.sleep(time) – время задержки, где time – время в мсек.

Эти две функции, вызванные в теле циклической процедуры по параметру времени и в отношении указанных двух каналов, позволяют реализовать любой алгоритм управления.

На рис. 8 показана процедура тестирования натурной и виртуальной модели робота в масштабе 1:10, собранная на платформе Injora, которая оказалась весьма удобной для тестирования алгоритмов траекторного управления в натурной среде.

Рис. 8. Тестирования натурной и виртуальной модели робота в масштабе 1:10

На рис. 9 показана процедура тестирования виртуальной модели робота в масштабе 1:4.

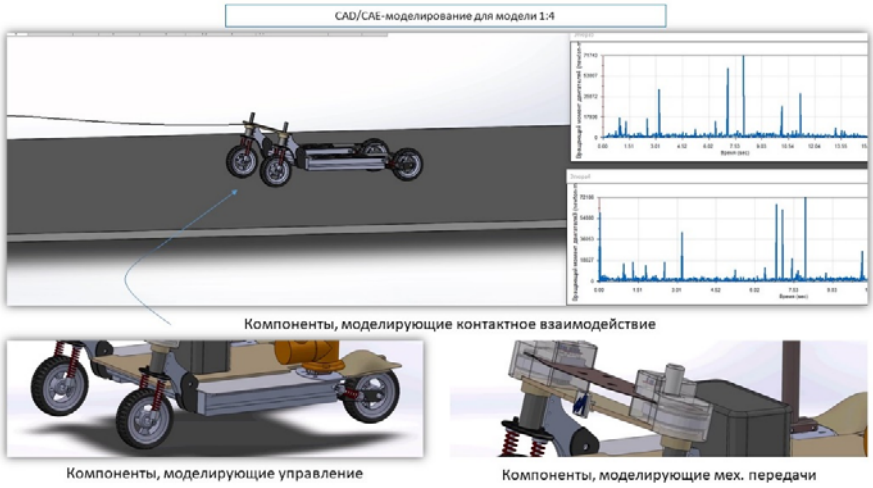


Рис. 9. Тестирование виртуальной модели робота в масштабе 1:4

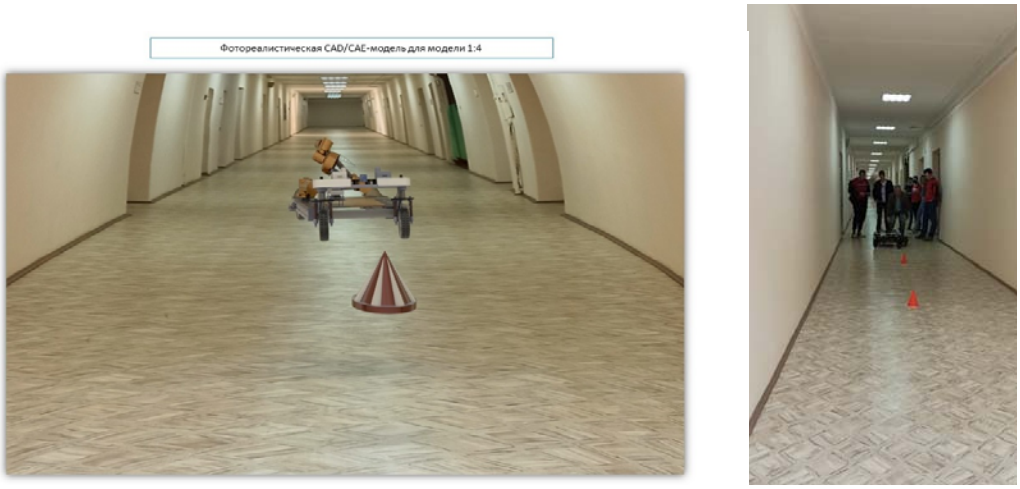


Рис. 10. Тестирования виртуальной и натурной модели робота в масштабе 1:4

На рис. 10 показана процедура тестирования виртуальной модели робота в масштабе 1:4 в фотореалистическом варианте, а также тестирование натурного робота в том же масштабе.

На рис. 11 показана процедура тестирования интегрированной (виртуальной и натурной) модели робота в масштабе 1:4.

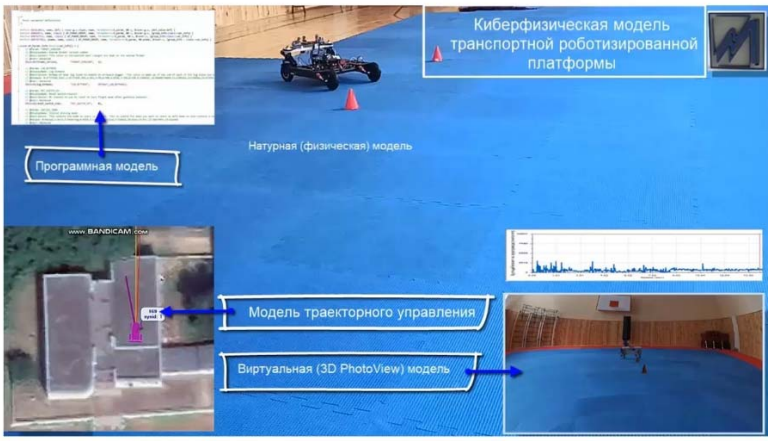


Рис. 11. Тестирования натурной и виртуальной модели робота в масштабе 1:4

Натурная и виртуальная модели робота с единой системой программного управления [13] движутся по запланированной траектории в физической и виртуальной среде соответственно.

Авторы выражают признательность Фонду содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, поддержавшего данный проект по программе УМНИК.

Список литературы

1. Чугунов М.В., Полунина И.Н. Междисциплинарное моделирование роботов с использованием систем автоматизированного проектирования // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 2. С. 181–190. DOI: 10.15507/0236-2910.028.201802.181-190 .

2. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Попков М.А. Проектирование квадрокоптера на базе интегрированной модельной среды // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 169–186. DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902.169-186 .

3. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Дивин А.Г. [и др.] Интегрированная модель мобильной роботизированной платформы // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 4. С. 609–627. DOI: 10.15507/2658-4123.031.202104.609-627.

4. Лакомкин И.А., Коткин А.А., Ермишов И.А., Цыбисов А.А., Чугунов М.В. Программно-аппаратное решение для мобильной роботизированной платформы // Сб. тр. всерос. с междунар. участ. науч. конф. «L Огарёвские чтения»: в 3 ч. 06 ноября – 11 декабря 2021 года/ Отв. за выпуск А.М. Давыдкин, сост. Г.В. Терехина. Саранск, 2022. Ч.1. С. 774-779.

5. Васильев А.В. Обобщённая классификация мобильных роботов // Экстремальная робототехника. 2014. Т. 1. № 1. С. 41-45.

6. Васильев А.В. Принципы построения и классификация шасси мобильных роботов наземного применения и планетоходов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 1(164). С. 124-131.

7. Px4. Open Source Autopilot: официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: https://px4.io (дата обращения: 10.05.2023).

8. ArduPilot: официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html (дата обращения: 10.05.2023).

9. Савенков Н.В., Понякин В.В., Чекулаев С.А., Бутенко В.В. Анализ характеристик современного оборудования для определения тягово-скоростных свойств автомобилей в лабораторных условиях// Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". 2019. Т.16, №3. С. 276-289. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-3-276-289.

10. Стенд "Сопротивление материалов" (СМ-1): официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: https://profistend.info/catalog/stend-soprotivlenie-materialov-sm-1.html (дата обращения: 10.05.2023).

11. Берестова С.А., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А. Кинематическое управление движением колесных транспортных средств // Вестн. Удмуртск. ун-та. Матем. Мех. Компьют. науки. 2015. Т. 25, № 2. С. 254–266. URL: http://www.mathnet.ru/links/0ee54f8b9a883b3110138244e322e405/vuu482.pdf (дата обращения: 14.02.2021).

12. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в 3 т. / Под ред. И.А. Биргера,Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, Т.2. 1968. 462 с.

13. Чугунов М. В, Полунина И. Н., Ермишов И. А. Программное обеспечение для траекторного управления виртуальным мобильным роботом на базе Ardupilot // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 8. С. 386-389. DOI 10.24412/2071-6168-2022-8-386-390. EDN LFIDET.

Чугунов Михаил Владимирович, канд. техн. наук, доцен, заведующий кафедрой, m.v.chugunov@mail.ru, Россия, Саранск, Мордовский государственный университет,

Полунина Ирина Николаевна, канд. пед. наук, доцент, my_pk@mail.ru, Россия, Саранск, Мордовский государственный университет,

Ермишов Иван Алексеевич, студент, my_pk@mail.ru, Россия, Саранск, Мордовский государственный университет

INTEGRATED MODELS OF MOBILE ROBOT TRANSPORT PLATFORM

M.V. Chugunov, I.N. Polunina, I.A. Ermishov

The article presents integrated virtual (CAx) and full-scale models of the transport platform of a mobile robot. Models are made on different scales, which simplifies the solution of specific tasks of analyzing design solutions. The main tool for integrating models of different types is a single control system. The necessary parameters of the carrier system, chassis, electric and servo drives are determined on the basis of numerical and field experiments.

Key words: mobile robot, transport platform, full-scale, virtual and integrated models, full-scale and numerical experiment.

Chugunov Mikhail Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, m.v.chugunov@mail.ru, Russian, Saransk, Mordovian State University,

Polunina Irina Nikolaevna, candidate of pedagogical sciences, docent, my_pk@mail.ru, Russian, Saransk, Mordovian State University,

Ermishov Ivan Alekseyevich, student, my_pk@mail.ru, Russian, Saransk, Mordovian State University

УДК 629.12:007.52
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-534-535

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАДВОДНЫМИ БЕСПИЛОТНЫМИ ПЛАТФОРМАМИ

А. С. Майстро, А.С. Глуханов, Д. Д. Сидоренко

В статье представлена собственная архитектура системы управления робототехническим комплексом с безэкипажным катером, учитывающая функции, необходимые для дистанционной и автоматической работы в соответствии с положениями по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов. Приведены результаты натурных экспериментов по управлению безэкипажным катером в условиях стандартных маршрутных заданий.

Ключевые слова: безэкипажный катер, надводная беспилотная платформа, система управления, программное обеспечение, протоколы передачи данных.

Надводные беспилотные платформы, построенные на основе маломерных катеров, катамаранов, конвертированных в безэкипажные катера (далее БЭК) имеют целый ряд приложений [1-3]. Можно сформулировать следующие классы задач: научные исследования, исследование океанов и морей, поисковые задачи, доставка грузов, экологические задачи, обследование закрытых водоемов, поиск подводных объектов.

Постановка задачи. Широта выполняемых задач требует соответствующего проектирования конструкции судна и системы управления, которая в свою очередь должна поддерживать простоту добавления новых функций, обеспечивать надежность, простоту замены комплектующих, в том числе на отечественные аналоги. Для выполнения всех этих требований была разработана общая схема системы управления, которая может быть выбрана в качестве базовой для разработки новых надводных платформ. Предлагаемое решение имеет большие возможности для расширения функций робототехнического комплекса.

Архитектура сети. При управлении платформой возникают задачи по передаче следующих групп данных:

1.телеметрия положения судна;
2.телеметрия модулей полезной нагрузки;
3.команды ручного управления пропульсивной установки;
4.команды модулей полезной нагрузки;
5.статусы состояния судна (предупреждения и ошибки);
6.данные миссии.

Был разработан собственный закрытый зашифрованный протокол передачи данных с возможностями узкополосного и широкополосного доступа и многофакторной аутентификации. Схема сетевой архитектуры комплекса состоит из части, расположенной на БЭК, и части, расположенной на станции управления (рис. 1).

Отправка команд управления и сбор телеметрии с двигателя судна происходит по закрытому протоколу с многофакторной аутентификацией. Для работы с модулем полезной нагрузки был разработан закрытый протокол, в котором для передачи необходимых значений и параметров были описаны собственные типы данных и разработан модуль шифрования.

В случае неполадок или невозможности работы основной сети используется сеть узкополосного доступа. Эта сеть имеет более низкую частоту и не конфликтует с сетью погодных радаров на судах. Для увеличения дальности передачи информации группа БЭК может выстраиваться в линию. Такой метод позволяет работать вдали от берега и ретрансляции данных, т.е. реализуется динамическая децентрализованная распределённая меш сеть.

Программная архитектура БЭК. Для выполнения специализированных вычислений в реальном времени и задач непосредственно на борту судна была применена операционная система реального времени FreeRTOS [4]. Интеллектуальная бортовая система судна включает следующие программные компоненты:

1. модуль навигации (расчет целевого курса, нечеткий регулятор курса, регулятор «притягивания» к линии, переключение точек вектора миссии, управление состоянием полезной нагрузки);
2. модуль работы с рулевым управлением (измерение положения линейного актуатора, регулятор линейного актуатора);
3. модуль работы с двигателем (сбор данных с двигателя, управление мощностью двигателя);
4. модуль управления подключениями (формирование структур и сообщений, отслеживание подключений, «парсинг» сообщений, запись объектов в вектор миссии, работа с настроечными параметрами);
5. модуль работы с бортовой сетью (прием, парсинг, сборка и отправка сообщений, формирование адресов и приоритетов);
6. модуль работы в сети широкополосного доступа (прием, парсинг, сборка и отправка сообщений, обеспечение стека работы);
7. модуль работы в сети узкополосного доступа (прием и отправка сообщений);
8. модуль работы с акселерометром (настройка акселерометра, сбор первичных данных, фильтрация данных с помощью фильтров и алгоритмов объединения данных и интеллектуальных алгоритмов снижения ошибки [5]);
9. модуль сбора данных со спутниковых систем связи (настройка модуля и сбор данных);
10. модуль сохранения данных в энергонезависимую память (запись и чтение константных параметров);
11. модуль системы расхождения с препятствиями.
12. модуль глобальной навигации.
13. модуль логирования данных на SD карту и RAID накопитель (сбор логируемых данных, управление файловой системой, запись, связь с внешними модулями).

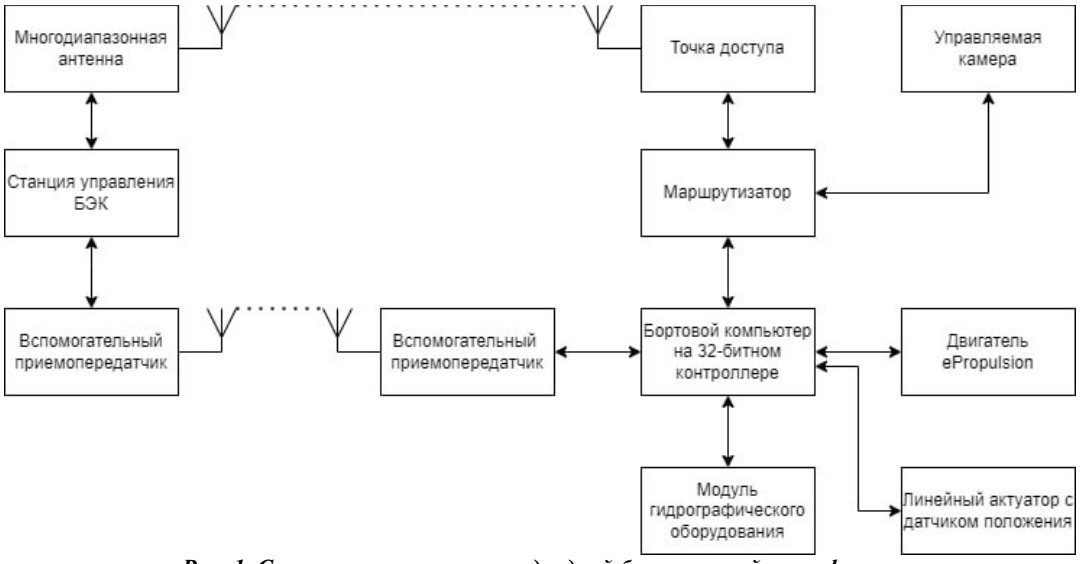


Рис. 1. Сетевая архитектура надводной беспилотной платформы

Описание состояний системы управления. В процессе своего функционирования система управления осуществляет переход между следующими состояниями:

Ручное управление РС: рулевое управление от команд от РС.

Нажата красная кнопка «заблокировать приводы»: приводы заблокированы.

Выполнение команды вектора навигации: отправка соответствующих команд на периферийные устройства, ожидание, работают провода, интерфейсы, осуществляется выполнение навигационных задач.

Швартовка: благодаря системе технического зрения комплекс осуществляет швартовку.

Движение на точку: в зависимости от состояния системы могут быть запущены: движение на точку из вектора навигации, движение на точку из глобального маршрута, движение на точку из локального маршрута, коррекция маршрута по МППСС.

Инициализация: опрос устройств на линиях шины данных и составление списка подключенных устройств.

Ожидание команд: прием команд от управляющего интерфейса, управление вектором навигации, конфигурационными параметрами.

Аварийное состояние «движение домой».

Выполнение маршрутного задания.

Диагностика систем.

Остановка приводов при потере связи с пультом.

Ручное управление с РС: система ждет команд от беспроводных интерфейсов.

Испытания системы управления. Для проверки работоспособности системы управления был проведен ряд классических экспериментов:

1. движение на свободном ходу (рис. 2);
2. движение в повороте (рис. 3);
3. прохождение маршрута «зигзаг» (рис. 4).

Управление осуществляется изменением угла пера руля, выходными характеристиками являются курс относительно грунта (COG) и направление диаметральной плоскости (HDG).

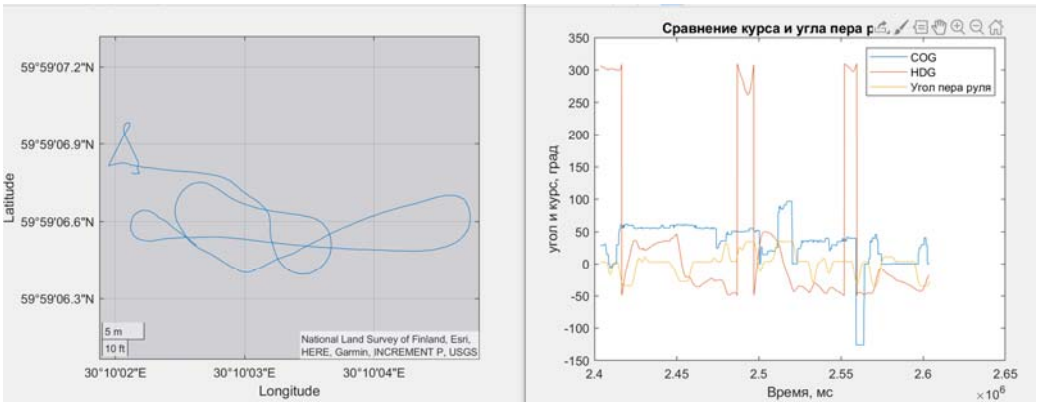


Рис. 2. Эксперимент «На свободном ходу».

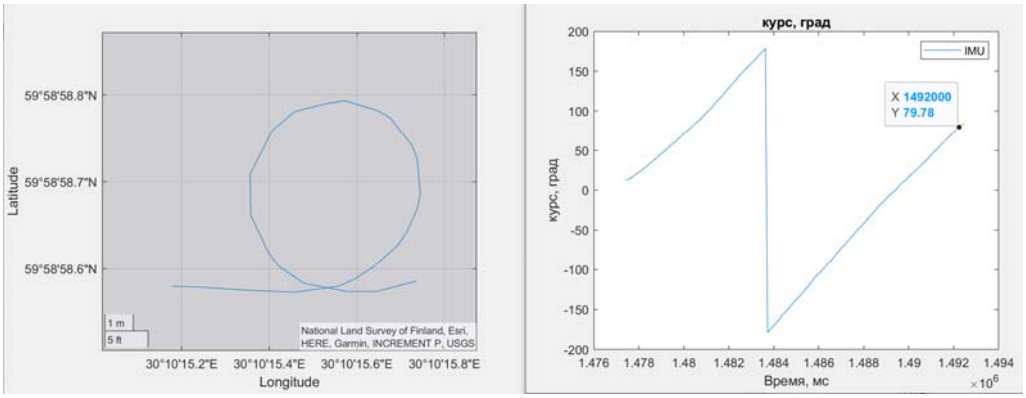


Рис. 3. Эксперимент «Поворот».

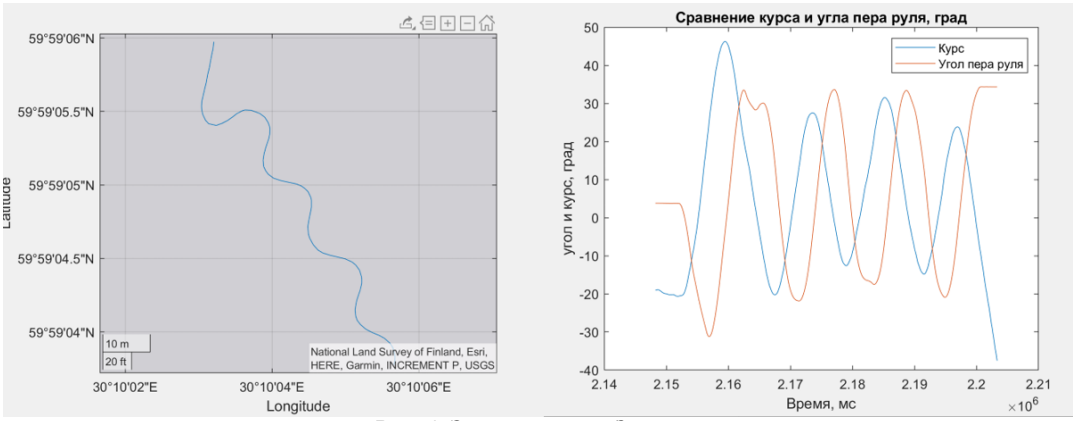


Рис. 4. Эксперимент «Зигзаг».

Заключение. Получена универсальная блок-схема системы управления беспилотной надводной платформы. Представлены результаты экспериментов по выполнению маршрутных заданий. Предлагаемые технические решения могут быть использованы в широкой линейке робототехнических комплексов.

Список литературы

1. Протасов М.С. Безэкипажное судоходство - новое направление для цифровой экономики / М. С. Протасов, Н. А. Воробьев // Матрица научного познания. 2021. № 2-1. С. 66-69.

2. Создание безэкипажного катера «СТРЕЛА» // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2022. № 3-2.

3. Liu Z. et al. Unmanned surface vehicles : An overview of developments and challenges // Annual Reviews in Control, 2016, №41. P. 71-93.

4. Курниц А. FreeRTOS – Операционная система для микроконтроллеров // Компоненты и Технологии, 2011, Т. 2.

5. Madgwick S.O.H., Harrison A.J.L. and Vaidyanathan R., «Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm» // IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland, 2011. P. 1-7.

Майстро Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, maystro@spbstu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Глухов Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, promo19_78@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

Сидоренко Данил Дмитриевич, инженер, mandryk.av@spbstu.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

CONTROL SYSTEM FOR SURFACE UNMANNED PLATFORMS

A.S. Maystro, A.S. Glukhanov, D.D. Sidorenko

The article presents our own architecture for the control system of a robotic complex with an unmanned boat, taking into account the functions necessary for remote and automatic operation in accordance with the provisions for the classification of marine autonomous and remotely controlled surface vessels. The results of full-scale experiments on the control of an unmanned boat under the conditions of standard route tasks are presented.

Key words: unmanned boat, surface unmanned platform, control system, software, data transmission protocols.

Maystro Alexey Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, maystro@spbstu.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Glukhanov Alexander Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, promo19_78@mail.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

Sidorenko Danil Dmitrievich, engineer, mandryk.av@spbstu.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

УДК 629.78
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-537-538

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ЗАТРАТ НА ПОДДЕРЖАНИЕ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Р.И. Горяинов, И.В. Левко, М.С. Жарких

Рассмотрены актуальные вопросы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния автоматизированных систем специального назначения (АССН). В основу оценивания положена разработанная авторами методика оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния автоматизированных систем обработки данных. При создании АССН на основе современных инфокоммуникационных систем, являющихся результатом конвергенции телекоммуникационных сетей и информационных систем, возникает ряд трудностей, среди которых важнейшей является оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: технологическое состоние, автоматизация, инфокоммуникационные системы.

В настоящее время опубликован ряд статей, посвященных вопросам оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния автоматизированных систем [1…3]. Однако вопросы построения методик оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния автоматизированных систем специального назначения (АССН) рассматривались недостаточно полно.

Автоматизированные системы специального назначения – это совокупность функционально связанных органов управления, пунктов управления, систем, комплексов, средств автоматизации и связи, а также специальных систем, обеспечивающих сбор, обработку и передачу информации. Каждая из указанных составных частей (подсистем) АССН может иметь свою обособленную цель функционирования, которая связана с целью функционирования подсистемы более высокого уровня и с общей целью функционирования всей системы в целом.

При этом, стоимостные значения затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН напрямую зависят от значений текущего уровня их технического состояния, задаваемых, как правило, директивно руководством организации, исходя из соображения обеспечения информационной безопасности, оперативности обработки информации и текущих финансовых возможностей организации по их обеспечению.

В представляемой методике оценивания затрат на поддержание заданного уровня технического состояния АССН в качестве влияющих на систему случайных факторов и предумышленных воздействий нарушителей информационной безопасности, кроме текущей информации на входы подсистемы оценивания воздействуют случайные и преднамеренные аддитивные или мультипликативные сигналы, искажающие текущую информацию о техническом состоянии АССН.

Базовые подходы к решению задачи оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния. Для организации процессов оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН предлагается создавать оперативные подсистемы, обеспечивающие получение всех необходимых для их оценивания показателей в реальном масштабе времени. К такой информации относятся данные о параметрах работы и состоянии АССН, состоянии всех ее программно-аппаратных комплексов, элементов, и протекающих в них процессов.

Вся совокупность входов подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния является вектором размерности Z, равной числу входов, и с координатами Z_i, описывающими параметры элементов потока поступающей информации от датчиков оцениваемой системы.

Входная информация может меняться в процессе функционирования АССН. Поэтому для каждого i-го входа должна быть задана входная функции Z_i(t). При этом совокупность всех входных функций Z_i(t) для всех входов подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния формируют входную траекторию ее движения в пространстве параметров, которую можно задать векторной функцией $\mathbf{Z}(t)$.

Выходы подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния задаются по аналогии с входами. Совокупность выходов подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния задается на основе топологии, форм выходной информации и параметров выходных потоков, т.е. на основе совокупности зависимостей выходных функций $b_j(t)$ для всех выходов подсистемы оценивания технического состояния, образующих ее выходные значения $B(t)$, которые являются выражением функционирования подсистемы оценивания технического состояния, т.е.

$$B(t) = F\{Z(t)\}. \tag{1}$$

Однако просто задание $F\{...\}$ не является абсолютно достаточным, т.к. правила соответствия между выходной $B(t)$ и входной $Z(t)$ функциями могут быть реализованы различными способами. Поэтому описание подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния в предлагаемой методике дополняется заданием процедур ее функционирования (П). Эти процедуры определяют применяемые способы получения выходной многомерной функции $B(t)$ из входной функции $Z(t)$.

Таким образом, структура подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН в предлагаемой методике может быть задана совокупностью параметров $\{Z, F, \Pi\}$.

Так как на всех этапах процесса оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН присутствуют помехи, то правило, принятое для входов и выходов, будет иметь вид:

$$z_i(t) = z_{i0}(t) + \Delta z_i \quad \forall i = 1,,n, \tag{2}$$

$$b_j(t) = f[z_{i0}(t) + \Delta z_i] + \Delta b_j \quad \forall\, j = 1,,m, \tag{3}$$

где $\Delta z_i -$ допустимая погрешность для *i*-го входа подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния; $\Delta b_j -$ допустимая погрешность для *j*-го выхода подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния.

В силу сложности современных АССН существуют также трудности описания и выбора признаков, характеризующих техническое состояние: сигналы синхронизации процессов, службы времени, управления режимами и другие.

При описании методики оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния используется укрупненная модель входов и выходов отдельных признаков. Поэтому метод описания системы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния зависит того, с каких позиций осуществляется данное описание. В силу этого, описание может оказаться различным для одной и той же системы оценивания технического состояния. Так, подсистема оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния может иметь иерархическую структуру с точки зрения сбора, передачи и обработки исходной информации о состоянии АССН и централизованную структуру с точки зрения получения оценок (процедур оценивания) технического состояния.

Отличительной чертой разработанной методики оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния является то, что результатом реализации закона ее функционирования (1) является выработка информации $B(t)$, используемой для выработки решений по управлению и выделению определенных денежных и материальных ресурсов для поддержания АССН в рамках заданных границ параметров по безопасности, требуемой производительности и эргономики системы.

Задача оценивания технического состояния с формальной точки зрения. Рассмотрим структурные отношения в подсистеме оценивания технического состояния АССН. Функция (1) определяет закон функционирования в том смысле, что каждому значению параметров множества *Z* однозначно соответствует значение параметров множества *B*. При этом процесс процесс переработки входной информации в выходную может быть организован различно. Например, преобразование (1) заменяется эквивалентными преобразованиями [7, 8]:

$$\mathrm{B}_i^1 = F_i^1\{\mathrm{Z}_i\};\ \mathrm{Z}_i \subset \mathrm{Z};\ \cup \mathrm{Z}_i = Z;\ i = 1,...,n. \tag{4}$$

$$\mathrm{B} = F_1\ \{\mathrm{B}_i^1\};\ \mathrm{B}^1 = \{\mathrm{B}_1^1,...,\mathrm{B}_{n_1}^1\}. \tag{5}$$

Преобразование (4) целесообразно осуществить в два этапа. На первом этапе над подмножествами входных параметров $\mathrm{Z}_i \subset Z$ осуществляется преобразование F_i^1 и получаем промежуточный результат B_i^1, а затем вторичная информация B_i^1 проходит второе преобразование F_1 ,в результате которого получаем выходную информацию B.

Чтобы исходное преобразование (1) было эквивалентно преобразованию (4) необходимо выполнить соотношение:

$$F = F_1\ [F_1^1,...,F_{n_1}^1]\,. \tag{6}$$

В подсистеме оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния преобразования F_i^1 и F_1 осуществляются различными составляющими, поэтому соотношение (6) отражает собой вариант декомпозиции подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния на функциональные компоненты при сохранении общего закона ее функционирования.

Если декомпозиция функции преобразования F подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния выполняется отдельными функциональными компонентами, то частные подоператоры определяют и структуру подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН.

В разработанной методике оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН ее компонент $\chi-$ го ранга получает информацию J_i^{χ} (как правило, управляющую) от компонента $(\chi+1)-$ го ранга и выдает информацию $J_i^{\chi-1}$ (как правило, управляющую) на компонент $(\chi-1)-$ го ранга, получает информацию $\Sigma_i^{\chi-1}$ о состоянии с компонента $(\chi-1)-$ го ранга и посылает информацию Σ_i^{χ} о состоянии в вышестоящий компонент $(\chi+1)-$ го ранга, представлен на рисунке 1.

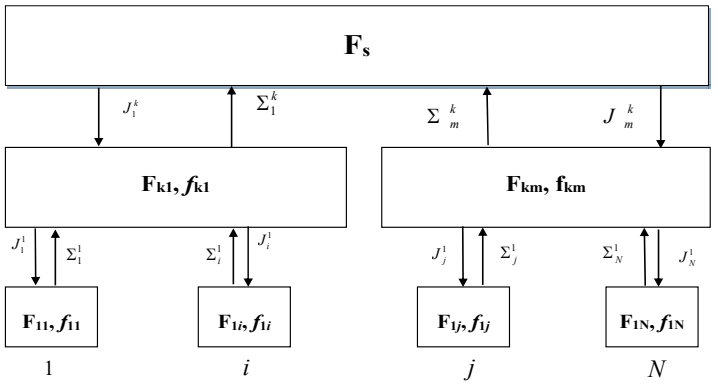


Рис. 1. Структура модели оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН

Функция такой модели оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН имеет вид:

$$R_{ir} = F_1\ \{\Sigma_i, \mathrm{F}_2[f_1, \mathrm{F}_3[f_2, \mathrm{F}_4[f_3, ..\mathrm{F}_{\chi-1}[f_{\chi\text{-}2}, F_{\chi}[f_{\chi\text{-}1}, ..., \mathrm{F}_s[f_{s\text{-}1}]\}\,, \tag{8}$$

где $F_{\chi}, f_{\chi}-$ операторы $\chi-$ го уровня иерархии подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН.

При этом работа компоненты $\chi-$ го ранга задается рекуррентными соотношениями:

$$J_i^{\chi-1} = F_{\chi}[\Sigma_i^{\chi-1}, J_i^{\chi}]\,. \tag{9}$$

$$\Sigma_i^{\chi} = f_{\chi}[\Sigma_i^{\chi-1}]\,. \tag{10}$$

Функционирование модели оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния Π определяются применяемыми способами получения оценок событий и параметров, характеризующих состояние АССН. Эти способы на каждом уровне модели оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния будут разными.

Описание методики оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния. В методике оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния применены способы оценки параметров, событий и процессов с применением аппарата математической статистики и вероятностных процессов.

Для оценивания событий применены положения теории вероятностей [6, 7]. Для оценивания значений случайных величин использованы операции получения значения их математического ожидания и дисперсии. При этом получение эффективных, несмещенных, состоятельных оценок моментов случайных величин, характеризующих работу технических элементов АССН в целом включены методы, достаточно хорошо разработанные в рамках математической статистики [6,7], а параметры и характеристики процессов – в теории случайных процессов [5, 6].

События для оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН могут быть простыми и сложными. Для простых характерно завершенность результата при появлении одного события. Например, сбой работы узла системы является простым событием. А последовательность сбойных ситуаций совокупности узлов, следующих одно за другим в определенной последовательности, является сложным событием, результат которого, как правило, выходит за рамки частных результатов.

Так как происходящие события нарушения работоспособности случайны, то можно получить определенные значения вероятностей их появления на основе статистической обработки. В качестве оценки вероятности каждого события выбрана величина, равная частности его появления за фиксированный промежуток времени Δt_{fics}.

При этом весь интервал Δt_{fics} разбит на интервалы $\Delta t_{fics}(i) \ \ \forall i = 1,..,k_f$, число которых определяется заданной точностью получаемых оценок, в каждом из которых фиксируют или не фиксируют то или иное событие $\Omega(\varsigma) \ \ \forall \varsigma = 1,...,k_\varsigma$.

Затем за интервал Δt_{fics} подсчитывают число $n_\varsigma = \sum_{i=1}^{k_{fics}} n_\varsigma(i)$ выявленных и зафиксированных событий $\varsigma -$го типа и вычисляют частоту их осуществления $C_{\Omega(\varsigma)} = \frac{1}{k_{fics}} \sum_{i=1}^{k_{fics}} n_\varsigma(i)$, используемой в качестве оценки вероятности данного события.

В случае косвенного оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН используются формулы полной вероятности и Байеса [6, 7].

Оценку параметров АССН, как случайных величин, получаем путем определения их моментов. Следовательно, оценка математического ожидания и дисперсии случайных величин, характеризующих работу элементов, фрагментов или всей АССН, представленных выборкой $x_1,...,x_i\ ,\ ...,\ x_n$, осуществляется следующим образом [5…7]:

$$m_x^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i\ , \tag{11}$$

$$D_x^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - m_x^*)^2 \cdot \tag{12}$$

Для определения статистической связи между случайными параметрами, характеризующими работу АССН, применяются методы корреляционного анализа [5, 7]. При этом используется коэффициент корреляции, определяемый соотношением

$$Q_{xy} = \frac{M\left[(X - m_x)\ \ (Y - m_y)\right]}{\sigma_x \sigma_y}\ , \tag{13}$$

где Y и X – случайные параметры АССН; σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения.

На практике при оценивании затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН целесообразно использовать модели одномерного корреляционного анализа [6, 7].

Величина ошибок оценивания параметров затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН зависит в первую очередь от объема выборки. Объем выборки выбирается таким, чтобы обеспечивалась достаточная точность оценивания параметра при выполнении требований по оперативности вычислений.

Задача статистической обработки при оценивании затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН осложняется тем, что во время ее функционирования, не всегда удается представить их в виде эргодических стационарных процессов. Поэтому в процессе оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН в предлагаемой методике наблюдаемый процесс сводится к стационарному, а затем оцениваются его параметры.

Конечно, математическое ожидание случайных процессов, характеризующих работу АССН не постоянно во времени, а корреляционная функция зависит от времени. Однако изменение этих характеристик на протяжении интервала стационарности мало и им в разработанной методике можно пренебречь.

Задача оценивания параметров случайных процессов, протекающих в АССН, в общем виде сформулирована следующим образом [1, 7]: в течение фиксированного интервала времени $\left[0 \le t \le T\right]$ наблюдается реализация $x(t)$ случайного процесса, описывающего исследуемый параметр АССН. Многомерная плотность вероятностей случайного процесса в общем случае содержит μ неизвестных параметров $L = [l_1,....,l_\mu]$, подлежащих оцениванию. Если многомерный параметр L является непрерывным в определенной области возможных значений S, то по наблюдаемой реализации x(t) принимается решение - какие значения имеют параметры $L = [l_1,....,l_\mu]$, т.е. на основе обработки реализации $x(t)$ вырабатывают оценку искомого многомерного параметра L.

В зависимости от того, какие требования предъявляются к процессу оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН, возможны разные критерии оценивания. Каждая оценка характеризуется своим показателем качества, указывающим меру точности оценки к истинному значению оцениваемого параметра.

Оцениваемый параметр, характеризующий работу АССН, является для системы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния случайной величиной. При этом наиболее полные сведения о возможных значениях параметра L задаются апостериорной плотностью вероятностей $f\left[l\middle|x(t)\right]$, которая является условной плотностью вероятностей параметра L в случае, если принята реализация $x(t)$.

Выражение для апостериорной плотности вероятностей может быть получено из теоремы условных вероятностей [5…7]:

$$f\left[l\middle|x(t)\right] = \frac{f[l] \cdot f\left[X\middle|l\right]}{f[X]}\ , \tag{14}$$

где f [l] – априорная плотность параметра l; f [X] – плотность вероятности выборки X из реализации $x(t)$.

Как апостериорная плотность параметра $f\left[l\middle|X\right]$, характеризующая работу АССН, так и отношение

правдоподобия являются случайными функциями, зависящими от реализации [5…7].

При проведении процедур оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН в процессе оценивания параметров, характеризующих работу АССН, используют интервальные и точечные оценки. Верхняя и нижняя границы доверительного интервала являются функциями от наблюдаемой реализации $x(t)$ случайного процесса.

При получении точечной оценки входному параметру присваивают одно значение из интервала всех значений, и на основе анализа наблюдаемой реализации $x(t)$ вырабатывается значение, используемое в дальнейшем в качестве истинного значения параметра АССН.

В процессе оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния получение оценок входных параметров, характеризующих техническое состояние АССН, является наиболее важной задачей. Так как любой поток входных параметров является неубывающей функцией времени, то при оценивании такого его параметра как интенсивность возможно два подхода.

Первый заключается в том, что оценивается математическое ожидание самого процесса $M[\Pi(t)]$, т.е. $m^*_{\Pi}(t)$, а затем путем дифференцирования – получается оценка интенсивности, т.е.:

$$\lambda^*(t) = \frac{dm^*_{\Pi}(t)}{dt} = \frac{dM[\overline{\Pi}(t)]}{dt}. \tag{15}$$

При этом наблюдаемое значение $\overleftarrow{\Pi}(t)$ неограниченно возрастает, что затрудняет проведение процедур оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН в условиях ограниченных финансовых и материальных ресурсов, что актуально в современных условиях санкционных действий западных стран в отношении развития информационных технологий в России.

Второй подход заключается в том, что весь интервал наблюдения разбивается на короткие временные интервалы Δt и вычисляются точечные оценки

$$\lambda^0(\Delta t) = \frac{\overline{\Pi}(\Delta t)}{\Delta t}. \tag{16}$$

По этим значениям осуществляется оценивание интенсивности потока входных значений и получение оценки $\lambda^*(t)$ в АССН.

Так как интенсивность реального потока входных значений технических параметров является детерминированной функцией, то точно выявить ее можно, только имея все множество реализаций. Наблюдая процесс на отдельных интервалах, мы получим оценки со смещением.

Получение оценки интенсивности потоков входных значений технических параметров $\lambda(t)$ с использованием метода наименьших квадратов [7] получается наблюдением реализации процесса $\lambda^0(t)$ на отрезке $[t-\Delta t,\ t]$, а искомая интенсивность потоков входных значений технических параметров представляется многочленом m-го порядка:

$$\lambda(t) = \sum_{\nu=0}^{m} a_\nu t_\nu \cdot \tag{17}$$

При этом интегральная среднеквадратическая ошибка оценки определяется выражением:

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{\Delta t}\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}} \left[\lambda^0(\tau) - \sum_{\nu=0}^{m} a_\nu \tau^\nu\right]^2 d\tau \cdot \tag{18}$$

Исходя из анализа процессов в АССН, в разработанной методике задаем определенную величину порядка m. В соответствии с методом наименьших квадратов выбираем значения коэффициентов a_ν, которые обеспечивают минимум функционала

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{n}\left[\lambda_i^0 - \sum_{\nu=0}^{m} a_\nu (t_i - t_0)^\nu\right]^2, \tag{19}$$

где $t_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i$.

Минимизация функционала (19) приводит к системе линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{\nu=0}^{m} a_{\nu+j} a_\nu = \beta_\nu, \tag{20}$$

где $a_{\nu+j} = \sum_{i=1}^{n}(t_i - t_0)^{\nu+j}$; $\beta_\nu = \sum_{i=1}^{n}(t_i - t_0)^\nu \lambda_i^0$.

Минимизация функционала (20), адаптированная к методике оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния автоматизированных систем обработки данных при использовании финансово-экономических показателей, позволит точно и обоснованно производить распределение денежных и материальных ресурсов на поддержание АССН в директивно заданных параметрах безопасности и производительности.

Недостатком классических методов при применении их для оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН является их достаточная сложность. Даже если задаться величиной $m \geq 2$, то при использовании для оценки интенсивности входных потоков измеряемых показателей метода наименьших квадратов, получается большой объем вычислений. Следует заметить, что на практике априорный вид изменения интенсивности входных потоков измеряемых показателей точно задать невозможно. Являясь детерминированным процессом, интенсивность потоков входных значений технических параметров все же остается неопределенной величиной.

Например, нам удалось правильно задать порядок многочлена, описывающего изменение интенсивности потоков входных значений технических параметров на данном интервале. Если оценка интенсивности используется при оценивании затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН, то она выступает в качестве прогнозной на другом интервале. Получение оценки сводится к определению коэффициентов a_v. На интервале прогноза значение их может измениться, что приведет к изменению модели интенсивности. Поэтому ошибка прогноза, кроме случайной составляющей будет содержать ошибку смещения, а методы оценивания должны обладать свойствами адаптации.

Заключение. Таким образом, разработанная методика оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН задается совокупностью методик: вектор-функцией Z (методики, описывающие множество наблюдаемых параметров технического состояния), вектор-функцией F (методики, описывающие множество законов функционирования подсистемы оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния АССН) и процедурами ее функционирования Π (методики, описывающие применяемые способы получения многомерной выходной функции из входной функции Z), которые выполняют вполне определенные функции, включающие функции уменьшения избыточной первичной информации, способы оценки моментов случайных величин, способы корреляционного анализа, а также способы оценки случайных процессов, характеризующих технические параметры АССН.

Список литературы

1. Основы построения и управления. М.: Изд-во Медиа Паблишер, 2015. 348 с.

2. Буренин А.Н., Легков К.Е. Модели процессов оценивания затрат организации на поддержание заданного уровня технического состояния при обеспечении оперативного контроля эксплуатации инфокоммуникационных сетей специального назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2011. Т. 3. № 2. С. 19–23.

3.Буренин А.Н., Легков К.Е., Нестеренко О.Е. К вопросу моделирования процессов оценивания инфокоммуникационных систем при обеспечении оперативного контроля эксплуатации инфокоммуникационных сетей специального назначения // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 3 (28). С. 9–15.

4. Коекин А.И. Структурный анализ информационных систем управления // Автоматизированные информационные системы. М.: Изд. ВЗПИ. 1970. С. 67- 75.

5. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М.: Мир, 1984. 1 т. 568 с.

6. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2002. 204 с.

7.Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. М.: Наука, 1971. 307 с.

Горяинов Роман Игоревич, адъюнкт, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

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

Жарких Максим Сергеевич, адъюнкт, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE COSTS OF MAINTAINING A GIVEN LEVEL OF TECHNICAL CONDITION OF AUTOMATED SYSTEMS FOR SPECIAL PURPOSES

R.I. Goryainov, I.V. Levko, M.S. Zharkih

The topical issues of estimating the costs of an organization to maintain a given level of technical condition of automated special-purpose systems (ASSN) are considered. The evaluation is based on the methodology developed by the authors for estimating an organization's costs for maintaining a given level of technical condition of automated data processing systems. When creating an ASSN based on modern infocommunication systems, which are the result of the convergence of telecommunication networks and information systems, a number of difficulties arise, among which the most important is estimating the organization's costs for maintaining a given level of technical condition of the ASSN in real time.

Key words: technological state, automation, infocommunication systems.

Goryainov Roman Igorevich, adjunct, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military space Academy named after A.F. Mozhayskiy,

Levko Igor Vladimiurovich, candidate of technical sciences, docent, Russia, Saint-Petersburg, Military space Academy named after A.F. Mozhayskiy,

Zharkih Maksim Sergeevich, adjunct, Russia, Saint-Petersburg, Military space Academy named after A.F. Mozhayskiy

УДК 681.5
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-543-544

ЭМУЛЯТОРЫ ARMABIS С АДАПТИВНЫМИ СВОЙСТВАМИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

М.Э. Аблязимов, А.В. Иващенко, А.С. Бордюг

В данной статье рассматриваются эмуляторы ARMABIS (Arbitrary Microprocessor-Based Industrial System) в планировочных системах автоматического управления. Цель исследования - разработать и оценить эффективность эмуляторов ARMABIS в контексте моделирования и анализа автоматических систем управления. Статья начинается с обзора принципов работы и возможностей эмуляторов ARMABIS. Представлены основные характеристики и области применения этих эмуляторов. Затем рассмотрены особенности и преимущества использования ARMABIS в планировочных системах автоматического управления, включая возможность моделирования различных типов процессов, аппаратных средств и коммуникационных интерфейсов. Далее представлены результаты симуляционных анализов, демонстрирующие эффективность эмуляторов ARMABIS в моделировании и оптимизации автоматических систем управления. Производительность, точность и скорость работы эмуляторов оценивается на примере различных задач управления. В заключение обсуждаются применение эмуляторов ARMABIS в инженерных и научных областях, подчеркивая их ценность и потенциал в разработке и отладке автоматических систем управления. Также представлены перспективы будущего развития и расширения возможностей ARMABIS, включая поддержку новых типов микропроцессоров и интеграцию с другими средствами разработки и симуляции.

Ключевые слова: эмуляторы, электропитание, система автоматического управления.

Общественная значимость данной работы состоит в том, что наш анализ подчеркивает значение эмуляторов ARMABIS в планировочных системах автоматического управления и их потенциал для разработки, отладки и оптимизации систем управления в широком спектре индустриальных и инженерных приложений.

Недавняя методика параметрического синтеза адаптивных ARMA - моделей нелинейных нестационарных динамичных объектов управление. Метод позволял объединить в одной ARMABIS-модели позитивные черты интуитивных и формализованных методик прогнозирования.

Блок эмуляции (идентификации) объекта с необходимым составным элементом подавляющего большинства современных интел лектуальных систем управления [1, 2].

Построение указателя блоков на основе нейронных сетей [1,2] позволяет в online режиме экстраполировать разностное уравнение, которые описывают динамический стаи объекта управления (данная модель широко известна под названием "авто регрессия") [3].

В статье рассматривается подход к построению обобщенной ARMABIS - модели динамического объекта, которая позволяет прогнозировать его выход или вход минимальной погрешностью и обеспечивать гарантированную устойчивость системы управления выбором соответствующего коэффициента регулирования критерий лага.

Модели дискретных стохастических процессов принято [4] записывать в виде выходного сигнала фильтра с неопределенной передаточной функцией *H(-).* Обычно вводятпредположение, что сигнал возмущения с белым шумом e(n), а передаточная функция имеет вид:

$$H_{(z)} = \frac{b_0+b_1z^{-1}+\ldots+b_qz^{-q}}{1+a_1z^{-1}+\ldots+a_pz^{-p}} \quad (1)$$

Связь входного u (n) и выходного *y (n)* сигналов в моделях дискретных стохастических процессов с передаточной функцией (1) принято [4,5,6] описывать модифицированным разностным уравнением:

$$y(t) = \sum_{i=0}^{q} y_1\xi(t-1) - \sum_{k=0}^{p} \beta_k y(t-1) \quad (2)$$

где ζ – независимая переменная.

Разность уравнения (2) характеризует авто регрисонные процессы $\sum_{k=1}^{p} \beta_k y(t-k)$ (AR(p) – модель с распределительным лагом зависимой (критериальной) переменной) со скользящим средним (MA(q) – модель с распределительным лагом регрессора) $\sum_{i=0}^{q} y_1\xi(t-1)$, или ARMA- процессы.

Поскольку предложенная [4] программа ЦЩМ (2) оперирует дискретными функциями входа и выхода, при применение в системах управления аппроксимируемых свойств интеллектуальных элементов (экспертные системы, нечеткая логика, нейронные сети (ШНМ), генетические алгоритмы и т.д.), появится возможность анализировать подобные системы путем исследования соответствующих свойств дискретных фильтров или ARMA – процессов.

Необходимо отметить, что в современной научной литературе [7,8,9] при освещении вопросов нейро управления, а именно в описанных методов синтеза структур нейро идентификации динамики объектов управления, используют следующую ЩНМ:

$$\gamma(k+1) = F(u_k, z^{-1}u_k, \ldots, z^{-m}u_k;\ \gamma_k, z^{-1}\gamma_k, \ldots, z^{-n}\gamma_k; w_1^{(l)} \quad (3)$$

где качество вектора состоянии ШНМ принимает вектор:

$$col(y, z^{-1}, \ldots, z^{-n}\gamma) = col(x_n(k), x_{n-1}(k), \ldots, x_1(k)) \quad (4)$$

где z^{-1} оператор сдвига

Результатом идентификации динамической модели реального объекта управления, в смысле наличия функций выхода (t) и y (t) с точностью к погрешностям нейронной сети $e(t) = y(t) - \gamma(t)$, с параметрических синтезированных, согласно определённому алгоритму, значения тяговых коэффициентов синоптичных связей $W_i^{(l)}$, в шагах ШНМ $l = \overline{\overline{1,K}}$, с оценкой вектора состояния объекта, который принято [7,8,9] описывать параметрическим нелинейным дифференциальным уравнения вида:

$$y(k+1) = f[y(k), y(k-1), \ldots, y(k-n+1); u(k), \ldots, u(k-m+1)] \quad (5)$$

Сопоставление уравнения (2) и (5) позволяет доказать, что параметрическим нелинейным дифференциальным уравнения (5) с обобщенной формой разностного уравнения (2), если учесть что тяговые коэффициенты $\beta_k(k = 0,1,2, \ldots, N)$ и $\alpha_k(k = 0,1,2, \ldots, N)$ могут быть определены на базе применения аппроксимирующих свойств

интеллектуальных элементов.

В соответствии с вышеизложенным, в качестве моделей прямой и обратной динамики объектов управления, как линейных, так и нелинейных нестационарных, может быть применена структура ARMA – модели с распределенным лагом (2). Вполне очевидно, что при моделировании динамики объектов управления ARMA – модель должна обладать адаптивными свойствами, которые с возможностью реализовать при применении лагового оператора (B):

$$B^{\tau} y_i = y_{i-\tau} \tag{6}$$

$$f(B) = a_n B^j + \ldots + a_1 B + a_0 \tag{7}$$

$$f(B) y_i = \left(\sum_{j=0}^{n} a_j B^j\right) y_i = \sum_{j=0}^{n} a_j (B^j y_i) = \sum_{j=0}^{n} a_j y_{i-j}, \tag{8}$$

Оператор разности (абсолютного прироста) Δ, определяется как (1-B)

$$\triangle y_i = 1 - B = y_i - y_{i-1}, \tag{9}$$

Если применить лаговый оператор (6) к ADL – модели (2) получим ADL (p,q) то получим:

$$y_i = \alpha + \beta f(B) y_i + g(B) x_i + \varepsilon_i \tag{10}$$

где *f*(B) и g(B) – полиномы.

Разностное уравнение (10) характеризует авто регресионные процессы (AR(p) – модель с распределенным лагом критериального параметра) со скользящим средним (MA(q) – модель с распределенным лагом регрессора).

Запишем дискретную ARMA – модель с распределенным лагом порядка (0,q) (MA(q)) для эталонного значения, выходной координаты объекта управления.

$$\dot{y}[i] = \alpha + \sum_{j=0}^{q} \gamma_j x[i-j] + \varepsilon[i] \tag{11}$$

Конечная разница порядка m имеет вид:

$$\triangle^m y[i] = \mu(1-B)^m = \mu(\triangle^{m-1} \dot{y}[i] - \triangle^{m-1} y[i-1]), i = 0 \ldots n-m \tag{12}$$

где μ – коэффициент регуляризации ADL – структуры.

Исключив из (12) эталонную величину, получаем дискретные адаптивные структуры моделей ADL (p,q), характеризующие адаптивные ARMA – процессы.

$$y[t] = \mu \sum_{j=0}^{q} \gamma_j x[i-j] * \left(\left[\sum_{j-1}^{p-1} (-1)^{j+1} * p * y[i-j]\right] + (-1)^{p+1} * y[i-j]\right) + \mu\varepsilon[i] \tag{13}$$

С целью придания адаптивных свойств ADL – моделям разработан алгоритм адаптации весовых коэффициентов y_0, y_1, $y \ldots y^n$ на базе модифицированного метода минимизации квадратного функционала:

$$J(\varepsilon_u) = 0.5 \varepsilon_u^T \varepsilon_u \tag{14}$$

Поскольку отсутствует явная зависимость вектора E, (по слагаемым (13)) и функции $J(\varepsilon_u)$ вид весовых коэффициентов y_0, y_1, $y \ldots y^n$ ошибка ε_u в процедуре адаптации модели (13) пересчитывается в обобщенные ошибки $\delta^{(1)}$, которые явно зависят от значений $y_{0,\ldots}$ y_1. При этом адаптация весовых коэффициентов модели (13) на шаге $[i+1]$ проводится соответственно к следующему шаблону:

$$\gamma_j[i+1] = \gamma_j[i] - h q^{(i-j)}[i] \Lambda^{(j)}[i] \tag{15}$$

где $q^{(i-j)}$ - распределительный лаг регрессора, h – скорость настройки.

$$\Lambda^{(j)}[i] = col\left(\frac{dJ}{dq_1^{(i-j)}}, \ldots, \frac{dJ}{dq_n^{(i-j)}}\right) = -\varepsilon_u[i] \tag{16}$$

следовательно

$$\gamma_j[i] = \gamma_j[i-1] + h * \varepsilon_u[i] * q[i-j-1],\ j = 0,1 \ldots 1, \lambda > 0 \tag{17}$$

Адаптационная ошибка $\varepsilon_u[i]$ определяется как разница эталонного значения и фактического результата модели.

С учетом уравнения k разница

$$\triangle^k f_1 = \sum_{v=0}^{k} (-1)^v C_k^v f_{i+k-v} \tag{18}$$

где C_k^v – биноминальные коэффициенты, которые определяются:

$$C_k^v = \frac{k!}{v!(k-v)!} \tag{19}$$

Адаптивная модель с распределенным лагом ADL(p,q) (13) может быть представлена в форме разностного уравнения путем преобразования обшей формы уравнения в конечные разницы.

$$a_p y[i] = d_0 \triangle^q \zeta[i] + d_1 \triangle^{q-1} \zeta[i] + \ldots + d_q \zeta[i] - a_1 \triangle^{p-1} y[i] - \ldots - a_0 \triangle^p y[i] + V\varepsilon[i] \tag{20}$$

$$c_p y[i] = b_0 \zeta[i+q] + b_1 \zeta[i+q-1] + \ldots b_q \zeta[i] - c_1 y[i+p-1] - \ldots c_p y[i] + V\varepsilon[i] \tag{21}$$

или, при сокращении дискретно:

$$c_{0y[i]} = b_0 \zeta[i+q-p] + b_1 \zeta[i+q-1-p] + \ldots + b_m[i-p] - c_1 y[i-1] - \ldots - c_n y[i-p] + V\varepsilon[i] \tag{22}$$

Общий шаблон разностного уравнения (22) позволяет записать уравнение модели ADL 9 (p,q) с учетом принятия в качестве регрессора входной координаты x:

$$y[i] - (1-\mu)\left(\sum_{j=1}^{p-z} (-1)^{j+1} * p * y[i-j]\right) - (1-\mu) * (-1)^{p+1} * y[i-p] = \mu \sum_{j=0}^{q} \gamma_j x[i-j] + \mu\varepsilon[i] \tag{23}$$

С учетом адаптивных свойств модели (13), которые обеспечивают нейронной сети настройкой весовых коэффициентов y_0, y_1, $y \ldots y^n$ (17) дискретные адаптивные структуры модели ADL (p,q), характеризующих адаптивные ARMA – процессы в дальнейшем будет называться ARMABIS (Autoregressive with Moving Average Brain – inspired System).

В соответствие с указанным выведением, характеристические уравнения ARMABIS – структуры имеет вид:

$$y[i] - (1-\mu)\left(\sum_{j=1}^{p-1} (-1)^{j+1} * p * y[i-j]\right) - (1-\mu) * (-1)^{p+1} * y[i-p] = 0 \tag{24}$$

Общее уравнение неоднородного разностного уравнения (23) представим в виде суммы переходной и вынужденной составляющей. Переходная составляющая определяется по общей формуле:

$$y(i) = C_1 \lambda_1^i + C_2 \lambda_2^i + \ldots + C_n \lambda_n^i \tag{25}$$

где λ_v (v=1,2,….,n) – некратные корни характеристического уравнения (24), C_v - произвольные постоянные.

Согласно уравнению переходной составляющей (25) условия затухания свободного движения системы (условия устойчивости), которая описывает разностные уравнения (23) имеет известный вид:

$$|\lambda_v| < 1 \qquad (v = 1,2, \ldots, n) \tag{26}$$

В соответствие с изложенным сформулирована научная новизна рассмотренного метода параметрического синтеза ARMABIS – моделей: разработана ARMABIS – модель со структурой ADK (p,q) обладает адаптивными свойствами за счет настройки весовых коэффициентов регрессионного лага (MA(p) – составляющая) на основе модифицированного градиентного метода минимизации квадратного функционала, а условия устойчивости системы обеспечивается настройкой весовых коэффициентов критериального лага (AR(q) – составляющая).

Необходимо отметить, что спецификация ARMA – процессов (определение лаговой структуры ARMABIS – моделей) (23) проводится в соответствии с разработанным методом оценки величины набольшего лага [10], который основывается на исследованиях конечных разностей переходной функции объекта.

Экспериментальное подтверждение умов устойчивости ARMABIS – структур. Запишем уравнение ARMABIS – модели ADL (2,2), с учетом принятия в качестве регрессора входной координаты:

$$y[i] = b_0 x[i] + b_1 x[i-1] + b_2 x[i-2] - C_1 y[i-1] - C_2 y[i-2] + \mu\varepsilon[i] \quad (27)$$

Характеристическое уравнение адаптивной модели ADK (2,2) имеет вид:

$$\lambda^2 - 2(1-\mu)\lambda - (\mu - 1) = 0 \quad (28)$$

В качестве примера рассмотрим характеристическое уравнение адаптивной модели ADL (2,2) с коэффициентом регулирование ARMABIS – структуры $\mu = 0.8$ и коэффициентом скорости весовых коэффициентов γ, $h = 0.05$. Корни характеристического уравнения:

$$\lambda^2 - 0.4\lambda + 0.2 = 0 \quad (29)$$

$$\lambda_{1,2} \approx 0.2 \pm j0.4 \quad (30)$$

Удовлетворяют условию (26), соответственно система является устойчивой. Проверим последний вывод на имитационной модели.

Модель адаптивного управления нестационарным объектом второго порядка на базе ARMSBIS – структуры ADL (2,2) (27) с эталонной моделью приведена на рисунке 1.

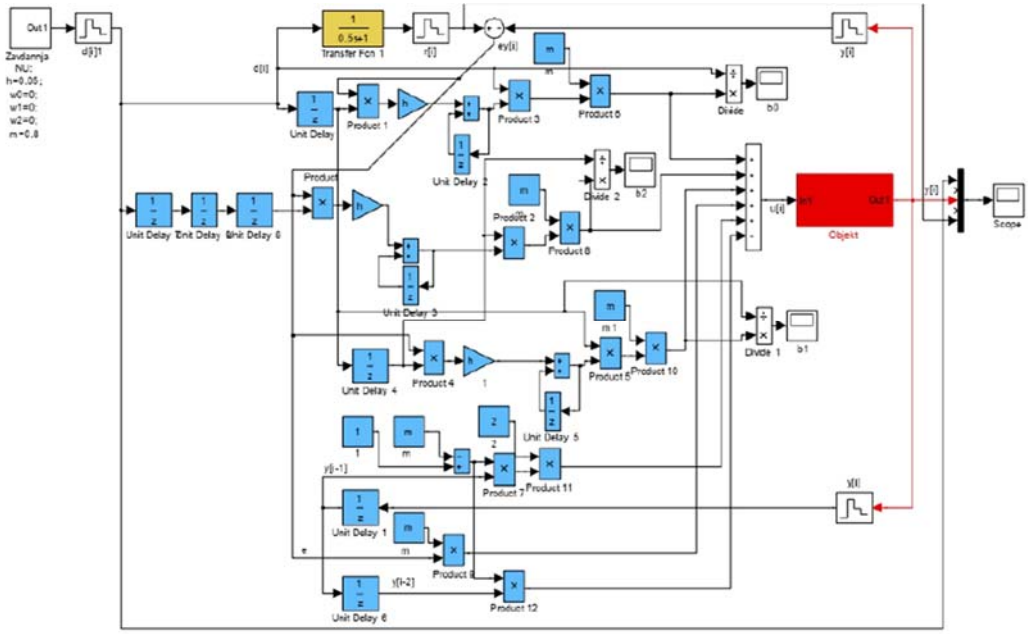


Рис. 1. Модель адаптивного управления нестационарным объектом на базе ARMABIS – структуры ADL (2,2)

Переходной процесс выходной координаты объекта управления приведен на рисунке 2.

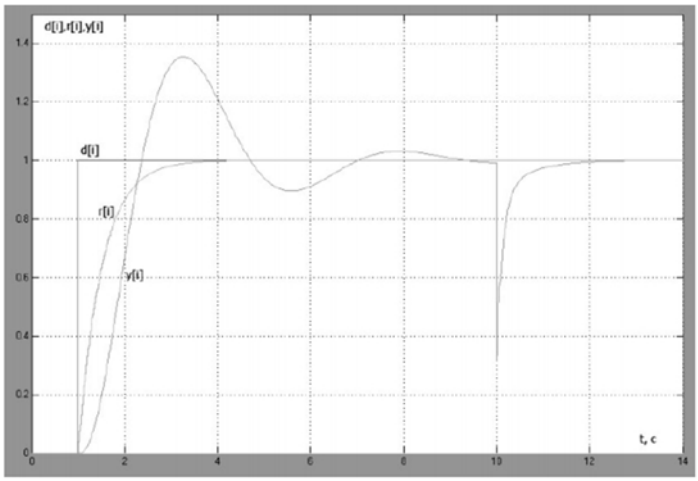


Рис. 2. Переходной процесс выходной координаты y[i] объекта управления, сигнал задачи d[i], переходной процесс r[i]

Проверим работу адаптивной САК с коэффициентом регулирование ARMABIS – структуры $\mu = 11.5$. Корни характеристического уравнения не удовлетворяют условию (26), соответственно система является не устойчивой.

Результаты моделирование системы с коэффициентом регуляризации 11.5 приведен на рисунке 3.

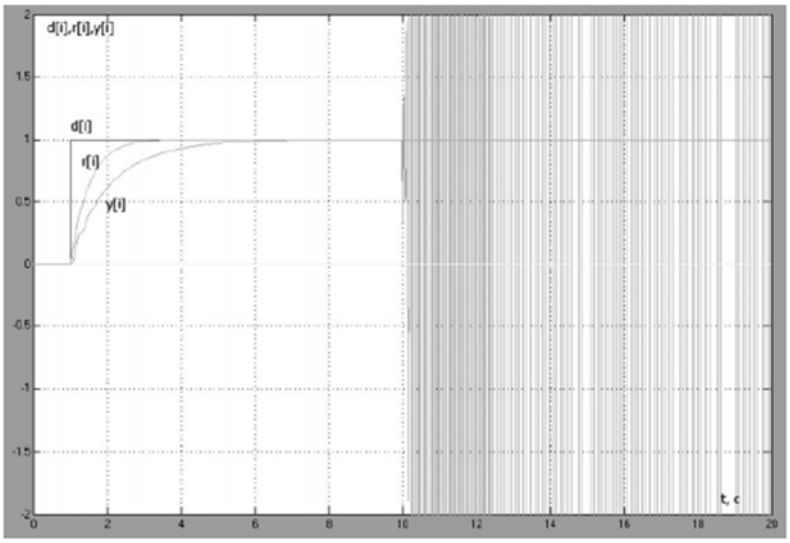


Рис. 3. Переходная характеристика системы с коэффициентом регуляризации

Вывод: разработанная ARMABIS – модель со структурой ADL (p,q) обладает адаптивными свойствами за счет настройки весовых коэффициентов регрессионного лага (MA(p) – составляющая) на основе градиентного метода минимизации квадратичного функционала, а устойчивость системы обеспечивается настройкой весовых коэффициентов критериального лага (AR(q) – составляющая). Данная модель может быть использована в качестве эмулятора прямой и обратной динамики нелинейных нестационарных объектов

Список литературы

1.Бордюг А.С. Применение циклического тестирования аппаратного обеспечения морских систем управления // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. Т. 16. № 3. С. 77-82.

2.Бордюг А.С. Моделирование интегрированных преобразователей энергии в судовых многогенераторных системах // Сборник трудов по материалам II Национальной научно-практической конференции преподавателей и аспирантов «Морские технологии: проблемы и решения – 2020» / под общ. ред. Е.П. Масюткина. Керчь, 2020. С. 47-51.

3.Sokolov S., Nyrkov A., Chernyi S., Nazarov N. Use of social engineering methods in transport: methods, protection, facts, consequences // Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020. Commemorating the 90th anniversary of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. Series “Lecture Notes in Civil Engineering”, 2021. P. 57-66.

4.Bordug A., Smetuch N., Antipenko I., Yashin A. Analysis of dynamic processes in maritime engines of ships // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. P. 816-824

5. Бордюг А.С. Идеология формирования типоразмерных рядов центробежных компрессоров судовой энергетической установки на базе автоматизированного проектирования // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2021. № 4. С. 126-138.

6. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации/ М.: Финансы статистика, 2004. С. 432.

7. Макаров И.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. М.: ФИЗМАЛИТ, 2001. С. 576.

8. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления: учебник пособие для вузов // В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. М.: Высшая школа. 2002. С. 183.

9. Александровский Н.М., Егоров С.В., Кузин Р.Е. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими объектами / под общей ред. Н.М. Александровского. М.: Энергия, 1973. 272 с.

10. Чаки Ф. Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные адаптивные системы / пер. с англ.; под ред. Н.С. Райбмана. М.: Мир, 1975.

Аблязимов Марлен Эдемович, курсант, ablyazimov2023@mail.ru, Россия, Керч, Керченский государственный морской технологический университет,

Иващенко Андрей Владимирович, курсант, adregivashenkovadimovich@gmail.ru, Россия, Керч, Керченский государственный морской технологический университет,

Бордюг Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, alexander.bordyug@mail.ru, Россия, Керч, Керченский государственный морской технологический университет

ARMABIS EMULATORS WITH ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL PROPERTIES

M.E. Ablyazimov, A.V. Ivashchenko, A.S. Bordyug

This article discusses ARMABIS (Arbitrary Microprocessor-Based Industrial System) emulators in automatic control planning systems. The purpose of the study is to develop and evaluate the effectiveness of ARMABIS emulators in the context of modeling and analysis of automatic control systems. The article begins with an overview of the principles of operation and capabilities of ARMABIS emulators. The main characteristics and applications of these emulators are presented. Then the features and advantages of using ARMABIS in planning automatic control systems are considered, including the possibility of modeling various types of processes, hardware and communication interfaces. The following are the results of simulation analyses demonstrating the effectiveness of ARMABIS emulators in modeling and optimizing automatic control systems. The performance, accuracy and speed of the emulators are evaluated using the example of various management tasks. In conclusion, the use of ARMABIS emulators in engineering and scientific fields is discussed, emphasizing their value and potential in the development and debugging of automatic control systems. The prospects for the future development and expansion of ARMABIS capabilities are also presented, including support for new types of microprocessors and integration with other development and simulation tools.

Key words: emulators, power supply, automatic control system.

Ablyazimov Marlene Edemovich, cadet, ablyazimov2023@mail.ru, Russia, Kerch, Kerch State Marine Technological University,

Andrey Vladimirovich Ivashchenko, cadet, adregivashenkovadimovich@gmail.ru, Russia, Kerch, Kerch State Marine Technological University,

Bordyug Alexander Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, alexander.bordyug@mail.ru, Russia, Kerch, Kerch State Marine Technological University

УДК 681.518
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-547-548

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ПРОЦЕССАМИ РЕЗАНИЯ В УСЛОВИЯХ ИХ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ

А.В. Анцев, В.В. Сальников, С.В. Сальников, Е.С. Янов

Рассмотрена структура системы информационной поддержки процесса производства. С целью формализации подхода к мониторингу процесса резания, обладающего возможностью оценки степени износа инструмента в условиях его вариабельности, иерархическая структура предприятий машиностроительного профиля представлена в виде множества уровней. Предложена структура информационно-измерительной и управляющей системы процессом резания для подразделения предприятия машиностроительного профиля, представляющего четвертый его иерархический уровень (участок, цех), учитывающей вариабельность процесса резания и позволяющая в том числе идентифицировать и износ режущего инструмента. Информационно-измерительная и управляющая система имеет четырех уровневую иерархическую структуру: первичные измерительные приборы; устройства сбора и подготовки данных; локальные центры сбора и обработки информации; главный центр сбора и обработки информации. Она отличающаяся тем, что в ней использованы математические модели энергопотребления технологического оборудования, учитывающие степень износа режущего инструмента и формирующие характеристики штатного режима его энергопотребления в заданных условиях функционирования. На основании анализа результатов их сравнения с информацией об энергопотреблении, поступающей с первичных измерительных приборов, система позволяет конкретизировать рекомендации по принятию решений об эксплуатации режущего инструмента.

Ключевые слова: процесс резания, износ режущего инструмента, исполнительные органы, модель энергопотребления, информационно-измерительная и управляющая система, потери мощности, причины нарушения режима энергопотребления.

Информационная система (ИС) современных предприятий машиностроительного профиля (ПМП) развивается по пути совершенствования информационной поддержки процессов жизненного цикла изделий [1-3]. В частности, электронный образ предмета производства формируется входящими в ИС ПМП системами CAE (Computer Aided Engineering), CAD (Computer Aided Design) и другими на стадии его проектирования. С их помощью получают: комплект конструкторской документации и 3-D модель, содержащие информацию о форме, размерах, качестве поверхностей, предельных отклонениях, материале каждой детали, входящей в изделие.

Системы CAM (Computer Aided Manufacturing), входящие в ИС ПМП, увеличивают объем информационного сопровождения предмета производства описанием технологических процессов (ТП), 3-D модели заготовки и управляющими программами для станков с ЧПУ. В ТП отражены: набор обрабатываемых поверхностей, маршруты, комплект инструментов и режимы обработки для преобразования заготовки в готовое изделие и параметры оборудования, на котором предлагается ее обрабатывать [4].

Для обеспечения процесса производства необходимыми ресурсами в ИС ПМП встроены системы управления цепочками поставок – Supply Chain Management (SCM) [4].

На этапе реализации производства используются десятки компонентов и подсистем ИС ПМП, отвечающих за решение различных задач, начиная от сбора данных с распределенной сети датчиков с помощью систем SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), мониторинга и управления производственными и технологическими процессами систем (АСУП и АСУТП), а также систем сбора параметров потребления энергетических ресурсов с помощью автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) и, заканчивая, оценкой эффективности всего предприятия. На рис. 1 приведен пример построения типовой информационной системы ПМП [5].

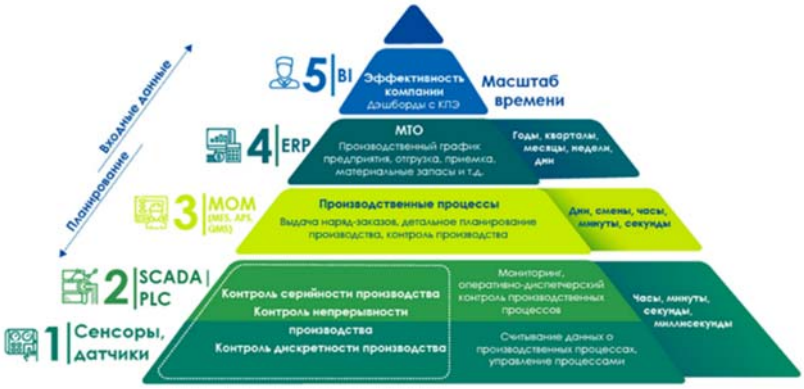


Рис. 1. Системы информационной поддержки процесса производства

На различных иерархических уровнях системы информационной поддержки процесса производства представлены подсистемы: SCADA (диспетчерское управление и сбор данных); PLC – Programmable Logic Controller (контроллер с программируемой логикой); MES – Manufacturing Execution System (система управления производственными процессами); APS – Advanced Planning & Scheduling (усовершенствованное планирование); ERP – Enterprise Resource Planning (планирование ресурсов предприятия); BI – Business Intelligence (Бизнес-аналитика).

Современная степень информатизации производства (рис. 1), а также постоянная тенденция ее роста показывают, что все параметры ТП, необходимые для его реализации, доступны всем подсистемам информационной системы ПМП, как на стадии подготовки производства, так и на стадии оперативного контроля [4].

Процесс резания до сих пор является одним из самых распространенных процессов формоизменения заготовок на ПМП. Он является последним звеном в цепочке элементов, участвующих в совершении «полезной работы» – создании новых конструктивно заданных поверхностей детали [6]. Эффективность процесса резания в первую очередь определяется режущей способностью инструмента. Она ухудшается по мере его износа, что приводит к снижению точности получаемых размеров, ухудшению качества обработанных поверхностей и дополнительным непроизводительным потерям энергии. Он неизбежно сопровождается и потерями энергии, связанными, в частности, с затратами на образование удаляемой части материала заготовки (стружки) и промежуточных поверхностей при многопроходной обработке. К этому следует добавить потери энергии в элементах и устройствах технологической системы, реализующих движения формообразования.

При таком подходе системы мониторинга энергопотребления используемые в ПМП безусловно характеризуют и эффективность процессов резания. Задача заключается в выделении информации, характеризующей собственно состояние режущего инструмента [7]. Она существенно усложняется в связи с его вариабельностью, обусловленной влиянием большого числа факторов, имеющих как детерминированный, так и стохастический характер.

Известные АСКУЭ, используемые в структуре информационной системы ПМП, не позволяют оценить эффективность энергопотребления как степень его соответствия спроектированному ТП и выбранным средствам технологического оснащения, а, следовательно, идентифицировать нарушения режима энергопотребления (НРЭ), связанные со степенью износа режущего инструмента, с целью принятия оперативных адекватных решений по выбору стратегии его эксплуатации.

Таким образом, разработка информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС) процесса резания с функцией идентификации степени износа инструмента является актуальной задачей. Для ее решения необходимо систематизировать факторы, оказывающие влияние на энергопотребление, в частности, технологического оборудования (ТО).

Постановка задачи. За основу систематизации НРЭ ПМП принято, что его источником является иерархический уровень ПМП, в котором произошли отклонения в условиях функционирования, а причиной – изменение параметров его элементов или циклов (алгоритмов) их работы.

Элементами ПМП, совершающими, как отмечено выше, полезную работу и потребляющими основной объем энергетических ресурсов, является ТО. Конкретизация возмущений, являющихся причиной НРЭ, базируется на анализе их компоновки, кинематической схемы, параметров исполнительных органов (ИО), ТП, характеристик реализуемого воздействия (режущей способности инструмента, его материала и степени износа), обрабатываемого материала и условий функционирования (конкретных настроек, производимых операторами ТО; режимов энергопитания).

Возмущения по компоновке, кинематической схеме, параметрам ИО ТО и ТП в большей части возникают при переносе ТП на другое ТО, отличающееся типоразмером, кинематической схемой, скоростями перемещений, мощностями, типом ИО и т. п.

Все возмущения на процесс резания с точки зрения энергопотребления выражаются в изменении либо полезной работы, либо потерь энергии в соответствующих элементах ТО.

Полезная работа, производимая ТО над материальным потоком (исходным сырьем, заготовкой) с целью изменения его свойств, а также непроизводительные потери в его ИО определяются силовыми, скоростными и временными характеристиками воздействия на него.

Проведенный анализ производственного опыта и технической литературы показал, что на уровне ТП причинами являются отклонения в: характеристиках обрабатываемых материалов, режимах обработки, маршрутных ТП и управляющих программах (УП); на уровне ТО – типоразмере, циклограмме работы, характеристиках инструмента и его настроек; на уровне приводов – определяются его параметрами и настройками.

Таким образом, для расширения возможностей ИИУС энергетического мониторинга функцией идентификации нарушений процесса резания, вызванных недопустимым износом инструмента, необходимо дополнить их элементами формирования и анализа режима энергопотребления для текущих условий производства.

Формализация задачи исследований. Как отмечено выше ПМП является сложной динамической системой, в рамках которой взаимодействуют: оборудование, средства контроля и управления, вспомогательные и транспортные устройства, обрабатывающий инструмент и среды, находящиеся в постоянном движении и изменении, объекты производства, люди, осуществляющие процесс и управляющие им [8]. Объектами управления в них, как правило, являются конкретные ТП [9, 10] и ТО, реализующее их.

Любой ТП [11-13] ПМП может быть представлен в виде последовательности операций изменения конечного числа геометрических и/или физико-механических свойств заготовок, выполняемых в определенном временном интервале $t \in (t_H, t_K)$,где t_H, t_K – время начала и окончания операции ТП.

С целью формализации подхода к мониторингу процесса резания, обладающего возможностью оценки степени износа инструмента в условиях его вариабельности, иерархическую структуру ПМП представим в виде множества уровней [8, 14]:

$$L = \left\{ L^1, L^2, ..., L^j, ..., L^m \right\}, \tag{1}$$

где *m* – количество уровней иерархии промышленного предприятия.

Каждый *j*-ый уровень представлен в виде множества единиц ТО

$$L^j = \left\{ v_1^j, v_2^j, ..., v_i^j, ..., v_n^j \right\}, \tag{2}$$

где *n* – количество единиц ТО на *j*-ом уровне ПМП.

Каждый v_i^j элемент ПМП описан множествами параметров и переменных:

$$v_i^j = \left\langle U_i^j, X_i^j, Z_i^j, H_i^j \right\rangle, \tag{3}$$

где U_i^j, X_i^j, Z_i^j – множество входных, выходных и возмущающих переменных элемента, соответственно; H_i^j – множество параметров, не изменяющихся в процессе его работы (типоразмер ТО, его установленная мощность и др.).

Вход U_i^j элемента определяет характер его воздействия на заготовку [14]. Выход X_i^j элемента определяет режим его работы в конкретный момент времени. Причем, некоторые из выходов элемента $x_{mi}^{\ j} \subset X_i^j$ характеризуют процесс изменения свойств заготовки $v_{fi}^{\ j} = f(x_{mi}^{\ j})$. С точки зрения мониторинга, значения выходных переменных элемента определяют параметры его энергопотребления N_i^j при реализации операций ТП. Как было отмечено ранее, каждый *j*-ый уровень характеризуется определенной долей потерь энергии ΔN_i^j.

В процессах резания большинство основных операций связано с изменением свойств, характеризующих геометрию обрабатываемых поверхностей: размеров, формы и микрорельефа. Используемое для этого ТО реализует определенную схему воздействия инструмента на заготовку, которая конкретизирует виды их движений друг относительно друга. В общем случае они определяют процесс формообразования и делятся на движения подачи и главное движение [15]. Количество и технические характеристики ИО ТО определяют его технологические возможности и режим энергопотребления, характеризующий работу по преобразованию заготовки в готовую деталь.

Таким образом, процесс формообразования определяется параметрами элемента A^j_i и режимом его работы:

$$X_i^j = A_i^j \cap R_i^j, A_i^j \subset H_i^j, \tag{4}$$

Режим R_i^j задается набором компонент

$$R_i^j = \left\langle V_{fi}^{\ j}, G_i^j, T_i^j, M_i^j \right\rangle, \; R_i^j \subset U_i^j \tag{5}$$

где $V_{fi}^{\ j}$ – заданные скорости формообразования; G_i^j – геометрические параметры формообразования; T_i^j – параметры воздействия, свойственные *j*-му уровню иерархии ПМП; M_i^j – параметры, создающие условия для реализации воздействия на заготовку.

Тогда, энергопотребление есть функция качества технологических операций резания

$$\overline{N}_i^j = f(X_i^j) \tag{6}$$

Введенные обозначения иллюстрируются графически на рис. 2.

Полезные мощности, затрачиваемые *i*-ым элементом на *j*-ом уровне, выражены следующей зависимостью:

$$\overline{N}_i^j = e_i^j \cdot v_{fi}^{\ j}(x_{mi}^{\ j}), \tag{7}$$

где e_i^j, $v_{fi}^{\ j}(x_{mi}^{\ j})$ – удельное значение энергии, затрачиваемой на единичное изменение свойства, и скорость формообразования на *i*-ом элементе *j*-го уровня иерархии ПМП.

На основании обобщения большого число эмпирических, полу эмпирических и теоретических зависимостей силовых характеристик (мощности) воздействия на заготовку с целью изменения ее свойств определена функциональная связь полезной мощности резания с режимами обработки, параметрами инструмента и обрабатываемой заготовки [7].

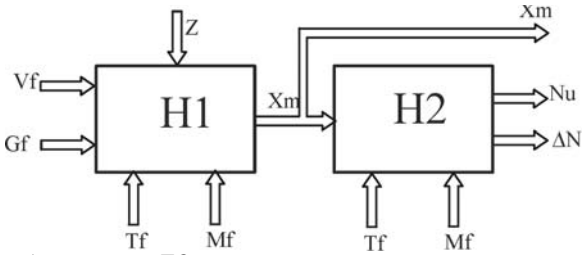


Рис. 2. Структурное представление ТО в системе мониторинга его энергопотребления: Н1 – блок формирования текущего представления геометрического образа обработанной поверхности; Н2 – блок формирования текущих значений составляющих энергопотребления

Тип и характеристики элемента ПМП конкретизируют процесс изменения свойств заготовок. В частности, в нем могут быть использованы несколько исполнительных органов, тогда затрачиваемая мощность определяется их совокупным действием.

$$\overline{N}_i^j = \sum_k e_{i\,k}^j \cdot v_{f\,i\,k}^{\ j}(x_{mi\,k}^{\ j}), x_{mi\,k}^{\ j} \subset x_{mi}^{\ j}, \tag{8}$$

где $v_{f\,i\,k}^{\ j}$ – проекция вектора скорости изменения свойства на направление действия *k*-го исполнительного механизма.

Учитывая зависимость КПД исполнительных органов от нагрузки, полная мощность [16-19], потребляемая *i*-ым элементом на *j*-ом уровне

$$\Delta\overline{N}_i^j = \sum_k \frac{e_{i\,k}^j \cdot v_{f\,i\,k}^{\ j}(x_{mi\,k}^{\ j})}{\eta_{i\,k}^j(x_{mi\,k}^{\ j})},\ x_{mi\,k}^{\ j} \subset x_{mi}^{\ j}, \tag{9}$$

где $\eta_{i\,k}^j(x_{mi\,k}^{\ j})$ – зависимость КПД ИО от режима его работы.

Таким образом, на потребляемую мощность оказывают влияние не только параметры ТП, но и характеристики используемого оборудования и режущего инструмента.

Нарушение режима энергопотребления в большинстве случаев связано с флуктуацией параметров ТО или возмущений по входу, поэтому контроль энергопотребления позволяет судить об эффективности, в частности, процессов резания и качестве реализуемого ТП.

Структура ИИУС процесса резания. Энергетический мониторинг ТО предполагает контроль соответствия режима энергопотребления заданному ТП. Он позволяет получать оценку способности достигать требуемого результата при идеальном способе использования ресурсов и в отсутствии воздействия внешней среды, т. е. оценку потенциальной эффективности функционирования системы [20]. Таким образом, для оценки эффективности, например, процессов резания необходимо контролировать не только режим энергопотребления и текущие параметры ТП, но и формализовать критерии их соответствия [21-23].

При таком подходе помимо задач получения информации о текущем режиме энергопотребления, получаемой с помощью известных ИИУС энергетического мониторинга (ИИУСЭМ), и требуемых параметрах ТП, получаемой с SCADA, необходимо решить задачу определения степени соответствия этих двух видов информации. Очевидно, для этого ИИУС на основании технологической информации должна генерировать желаемый или штатный режим энергопотребления, то есть моделировать его в реальном времени.

Кроме этого ИИУСЭМ должна иметь критерии НРЭ, с помощью которых сможет определять момент времени, когда изменения параметров оборудования (износ инструмента) и ТП привели к выходу энергопотребления за допустимые пределы. Причем для принятия решения о внесении каких-либо изменений необходимо получить информацию о наиболее вероятных источниках нарушения энергопотребления. Одним из способов ее получения является моделирование их влияния на энергопотребление.

На основании анализа известных ИИУСЭМ, а также рекомендаций [24], предложена модифицированная структура, для подразделения ПМП, представляющего 4-й ее иерархический уровень (*j* = 4 участок, цех), позволяющая в том числе идентифицировать и износ режущего инструмента (рис. 3).

ИИУС имеет 4-х уровневую иерархическую структуру: первичные измерительные приборы (ПИП); устройства сбора и подготовки данных (УСПД); локальные центры сбора и обработки информации (ЛЦОИ); главный центр сбора и обработки информации (ЦОИ). Она содержит традиционные средства контроля и учета как энергетических $\{\tilde{x}_{э_k}(t)\}$, так и технологических параметров $\{\tilde{x}_{m_k}(t)\}$ функционирования ТО, каналы связи и программное обеспечение, позволяющее осуществлять сбор, учет и хранение данных, входящих в блок SCADA/АСКУЭ.

На структурной схеме отражены дополнительно введенные связи, обеспечивающие возможность идентификации причин нарушения режимов энергопотребления, связанных в частности с износом режущего инструмента:

- ЛЦОИ с подсистемой SCADA ИС ПМП, для получения информации о характеристиках обрабатываемых заготовок, системами ЧПУ ТО, для получения информации о технологических параметрах их функционирования и оставшемся ресурсе используемых режущих инструментов;
- ПИП с приборами измерения энергопотребления ИО и ТО в целом.

Кроме этого на уровне ЛЦОИ в ИИУС интегрированы следующие программные блоки: математические модели энергопотребления ТО (ММЭТО), формирования входного воздействия (БФВВ), оценки отклонений режима энергопотребления (БООРЭ), формирования возмущений (БФВ) и идентификации источников и причин нарушения режима энергопотребления (рис. 4).

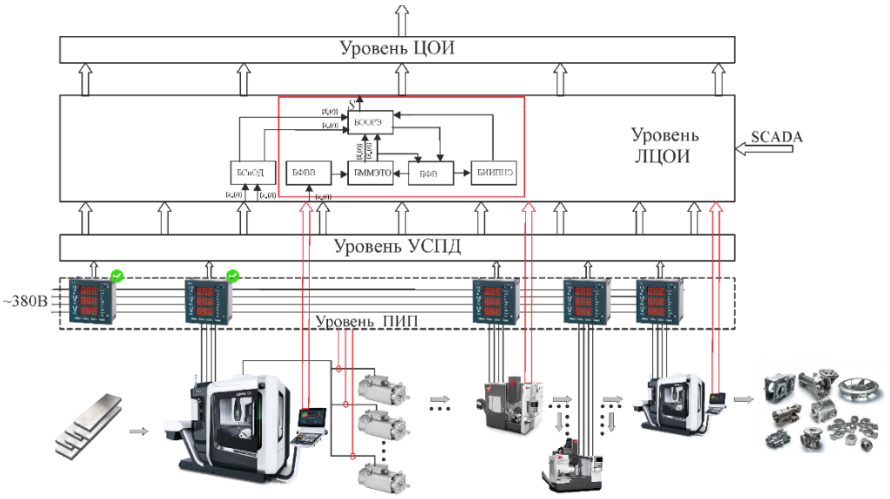


Рис. 3. Структурная схема ИИУС процесса резания по энергопотреблению для участка многоцелевых станков ПМП

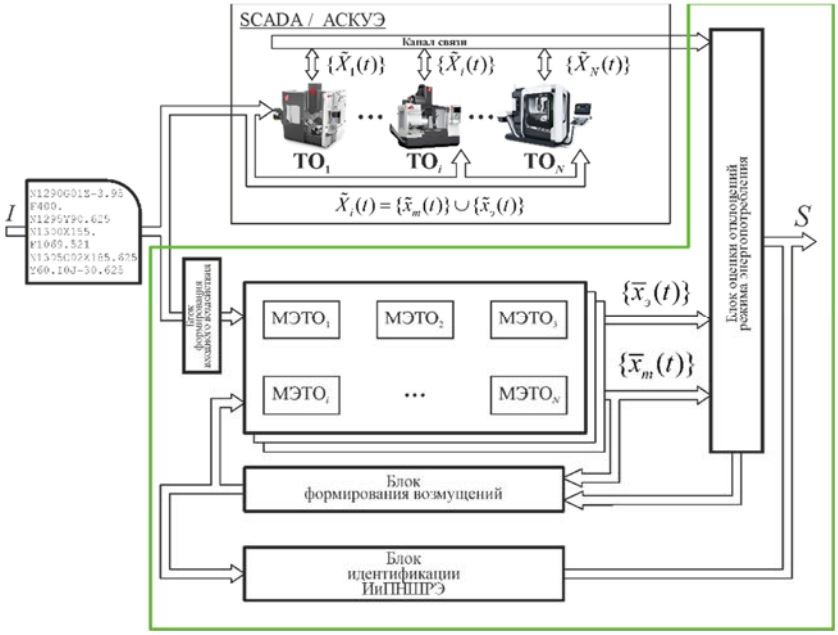


Рис. 4. Уровень ЛЦОИ модифицированной структуры ИИУС

Блок моделей энергопотребления ТО обеспечивает формирование информации о штатном режиме энергопотребления, представляющей собой диаграммы полезной и полной мощностей и энергию, потребляемую его приводами [25].

Блок формирования входного воздействия на ММЭТО обеспечивает преобразование информации, регламентирующей режим работы реального ТО и формируемой на основании управляющей программы системы ЧПУ [26, 27].

Блок оценки отклонений от штатного режима энергопотребления, определяемого ММЭТО, основан на сравнении графиков потребления активной мощности $N_i^j(t)$, и затраченной энергией $E_i^j(t)=\int_0^t N_i^j(t)dt$ $i=\overline{1,n}$, *i*-ым ИО на *j*-ом иерархическом уровне ПМП $j=\overline{1,m}$.

Если обозначить $\bar{N}_i^j(t)$, $\bar{E}_i^j(t)$ как штатные (желаемые) значения. Тогда допустимые их значения

$$(1-\delta_{Ni}^j)\bar{N}_i^j(t)\le\hat{N}_i^j(t)\le(1+\delta_{Ni}^j)\bar{N}_i^j(t);\quad(1-\delta_{Ei}^j)\bar{E}_i^j(t)\le\hat{E}_i^j(t)\le(1+\delta_{Ei}^j)\bar{E}_i^j(t), \tag{10}$$

где δ_{Ni}^j, δ_{Ei}^j – радиусы области адекватности (допустимого отклонения энергопотребления от штатного режима), $\hat{N}_i^j$, $\hat{E}_i^j$ – допустимые значения потребляемой мощности и затраченной энергии соответственно.

Блок формирования возмущений генерирует векторы параметрических и входных возмущений на ММЭТО, приводя моделируемый процесс в соответствие с реальным.

Возмущения определяются через изменения параметров ТО, приводов (инерционности и демпфирования), реализуемых на нем ТП и условий функционирования, в частности износом режущего инструмента.

Параметрические возмущения задаются множеством возможных отклонений параметров его модели $\Delta a_{ij} \in \Omega^a$.

Входные возмущения вызваны флуктуацией условий функционирования и задаются множеством возможных отклонений упруго-диссипативных сил, действующих на приводы $f_i \in \Omega^f$.

Блок идентификации источников и причин нарушения режима энергопотребления на основании априорной систематизации их связи с моделируемыми режимами функционирования и возмущениями конкретизирует возможные их варианты.

Заключение. Предложена структура ИИУС процессом резания, учитывающая его вариабельность и отличающаяся от известных тем, что в ней использованы математические модели энергопотребления ТО, учитывающие степень износа режущего инструмента и формирующие характеристики штатного режима его энергопотребления в заданных условиях функционирования. На основании анализа результатов их сравнения с информацией об энергопотреблении, поступающей с первичных измерительных приборов, ИИУС позволяет конкретизировать рекомендации по принятию решений об эксплуатации режущего инструмента.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-4372.2022.4.

Список литературы

1. Салихзянова Н.А., Галлямова Д.Х. Роль информационных систем в эффективном управлении современным предприятием // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 4. С. 170-172.

2. Белякова Г.Я., Фокина Д.А. Цифровая экономика и новые подходы к управлению производственной кооперацией в машиностроении // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2019. № 5-1. С. 24-29.

3. Белякова Г.Я., Фокина Д.А. Особенности развития производственной кооперации машиностроителей в рамках ЕАЭС // Фундаментальные исследования. 2017. № 11-1. С. 190-194.

4. Salnikov V.V. Computer based support for efficient use of energy in manufacturing // Proc. 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). 2018. Pp. 565-568.

5. Our-Directions // PROF-IT GROUP. [Электронный ресурс] URL: https://prof-itgroup.com/business-areas/digital-industrial-integrator/our-directions/upravlenie-proizvodstvom (дата обращения 22.10.2023).

6. Сальников В.В., Ивутин А.Н. Роль технологической информации в обеспечении эффективного энергопотребления предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 8. Ч. 1. С. 165-170.

7. Информационное обеспечение энергетического мониторинга процессов резания / А.В. Анцев, В.В. Сальников, В.С. Сальников, А.А. Арсеньева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 10. С. 388-394. DOI 10.24412/2071-6168-2022-10-388-394.

8. Sychugov A., Frantsuzova Y., Salnikov V. (2020) Process Modeling for Energy Planning of Technological Systems. In: Radionov A., Karandaev A. (eds) Advances in Automation. RusAutoCon 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering. Cham: Springer, 2020. Vol. 641. Pp. 933-943.

9. ГОСТ 14.004-83 Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий (с Изменениями N 1, 2).

10. ГОСТ 3.1109-82 Единая система технологической документации (ЕСТД). Термины и определения основных понятий (с Изменением N 1).

11. Технология переработки природного газ и конденсата: Справочник: в 2 ч. М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2002. Ч. 1. 517 с.

12. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев [и др.] / Под ред. А. М. Дальского. М.: Изд-во МАИ, 2000. 364 с.

13. Патраков Н.Н., Курицына В.В. Моделирование дискретных технологических систем в производстве деталей аэрокосмической техники с позиции технологического наследования / Информационные технологии в проектировании и производстве. 2002. №2. С.67-71.

14. Salnikov V., Frantsuzova Y. Modeling of Production Process Energy Characteristics in Mechanical Engineering // In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_70.

15. Справочник проектировщика АСУ ТП / Под редакцией Г.Л. Смилянского. М.: Машиностроение, 1983. 527 с.

16. Михайлов О.П., Веселов О.В. Экспериментальное определение параметров привода металлорежущих станков // Станки и инструменты. 1990. №8. С. 9-10.

17. Комплексная автоматизация производства / Л.И. Волчкевич, М.П. Ковалев, М.М. Кузнецов. М.: Машиностроение, 1983. 269 с.

18. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.

19. Trzynadlowski A. Control of Induction Motors. London: Academic Press, 2001. 228 p. DOI: https://doi.org/10.1016/b978-0-12-701510-1.x5000-4.

20. Калдыбаев, Р.С. Адаптивные (самонастраивающиеся) системы автоматического управления // Международный студенческий научный вестник. 2020. № 6. С. 8.

21. Сальников В.В., Французова Ю.В. Один из аспектов энергосбережения на промышленных предприятиях // Системы управления электротехническими объектами (СУЭТО-8): Труды Восьмой всероссийской научно-практической конференции, Тула, 11–12 декабря 2018 года. Тула: Тульский государственный университет, 2018. С. 40-43.

22. Сальников В.В. Французова Ю.В. Один из аспектов разработки системы планирования и мониторинга энергетической эффективности промышленных предприятий // Инновационные наукоемкие информационные тех-

нологии: доклады студентов, аспирантов, молодых ученых на научно-технической конференции Тула: Изд-во ТулГУ, 2019.

23. Сальников С.В., Сальников В.В Информационное обеспечение состояния зоны резания при точении // Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Международный форум: тезисы. Изд-во: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (Санкт-Петербург). С. 149-151.

24. Сальников В.В. Информационно-измерительная и управляющая система энергетического мониторинга с идентификацией источников и причин нарушения режимов энергопотребления : специальность 2.2.11. : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сальников Владимир Владимирович, 2022. – 142 с.

25. Имитационное моделирование диагностики процессов резания на многоцелевых станках / А.В. Анцев, С.В. Сальников, Е.С. Янов, В.В. Сальников // СТИН. 2023. № 4. С. 23-28.

26. Сальников В.В., Французова Ю.В. Энергетический анализ управляющих программ для многоцелевых станков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. Том 7. № 2. С. 275-283.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660690 Российская Федерация. Программный модуль для анализа управляющих программ для станков с числовым программным управлением : № 2022619957 : заявл. 30.05.2022 : опубл. 08.06.2022 / В. В. Сальников; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет».

Анцев Александр Витальевич, д-р. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, a.antsev@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сальников Владимир Владимирович, канд. техн. наук, ассистент, vladimirsalnikov95@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сальников Сергей Владимирович, канд. техн. наук, руководитель отдела АСУТП, sergeysalnikov@yandex.ru, Россия, Тула, ООО «ТОЗ-Робототехника»,

Янов Евгений Сергеевич, канд. техн. наук, докторант, dexaik@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF CUTTING PROCESSES IN CONDITIONS OF THEIR VARIABILITY

A.V. Antsev, V.V. Salnikov, S.V. Salnikov, E.S. Yanov

The structure of the information support system for the production process is considered. In order to formalize the approach to monitoring the cutting process, which has the ability to assess the degree of tool wear in conditions of its variability, the hierarchical structure of machine-building enterprises is presented in the form of many levels. The structure of an information-measuring and control system for the cutting process is proposed for a department of a machine-building enterprise, representing its fourth hierarchical level (section, workshop), taking into account the variability of the cutting process and allowing, among other things, the identification and wear of the cutting tool. The information-measuring and control system has a four-level hierarchical structure: primary measuring instruments; data collection and preparation devices; local centers for collecting and processing information; the main center for collecting and processing information. It is distinguished by the fact that it uses mathematical models of energy consumption of technological equipment, taking into account the degree of wear of the cutting tool and forming the characteristics of the normal mode of its energy consumption under given operating conditions. Based on the analysis of the results of their comparison with information on energy consumption coming from primary measuring instruments, the system makes it possible to specify recommendations for making decisions about the operation of cutting tools.

Key words: cutting process, wear of the cutting tool, machine executive, energy consumption model, information-measuring and control system, power loss, causes of violation of the energy consumption regime.

Antsev Alexander Vitalyievich, doctor of technical science, docent, head of the department, a.antsev@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Salnikov Vladimir Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant, vladimirsalnikov95@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Salnikov Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, head of the automated control system department, sergeysalnikov@yandex.ru, Russia, Tula, LLC "TOZ-Robotics",

Yanov Evgeny Sergeevich, candidate of technical sciences, doctoral student, dexaik@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

УДК 629.113
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-554-555

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КУРСОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

Б.В. Журавский, С.И. Цехош

Статья посвящена актуальной проблеме повышения безопасности дорожного движения. Большое число современных автомобилей оснащается специальными системами для повышения активной безопасности. Применение данных систем позволяет снизить уровень аварийности на автомобильных дорогах. Следует учитывать, что эффективность работы систем для повышения активной безопасности автомобиля в значительной степени зависит от дорожных условий. В статье рассмотрено влияние изменения ряда параметров, характеризующих дорожные условия, на заданный показатель эффективности работы системы курсовой стабилизации.

Ключевые слова: дорожные условия, коэффициент сцепления, коэффициент сопротивления качению, радиус поворота, центробежная сила, поперечное скольжение, поперечная устойчивость, критическая скорость, система курсовой стабилизации, показатель эффективности.

В настоящее время большое число современных автомобилей оснащаются специальными системами, повышающими активную безопасность [1, 2, 3, 4]. Одной из таких широко распространённых систем является система курсовой стабилизации [5, 6, 7].

Система курсовой стабилизации автомобиля имеет электронное управление, в её состав входят датчики, исполнительные элементы и блок управления [7, 8]. Информация о параметрах, характеризующих движение, от датчиков поступает в блок управления, в котором происходит её обработка в соответствие с заложенными алгоритмами и генерирование управляющих сигналов, которые в свою очередь поступают к исполнительным элементам. Если фактическая траектория движения автомобиля не соответствует положению рулевого колеса, возникает занос или снос, то на одном из колёс автомобиля системой создаётся тормозной момент, а также за счёт влияния на работу двигателя уменьшается сила тяги на ведущих колёсах [9, 10, 11]. Тормозной момент, приложенный к определённому колесу, позволяет создать момент силы, стабилизирующий траекторию движения. Уменьшение силы тяги на ведущих колесах приводит к увеличению у них запаса по боковым реакциям.

Наличие на борту автомобиля целого ряда специальных систем, назначением которых является повышение активной безопасности, само по себе не позволяет гарантировать безаварийную эксплуатацию автомобиля. Как показывают проведённые исследования, системы, повышающие активную безопасность, при движении автомобиля в определённых дорожных условиях имеют достаточно ограниченную эффективность [12]. Зачастую, знания о наличии на борту автомобиля систем, повышающих как пассивную, так и активную безопасность, и отсутствие знаний об имеющихся ограничениях при работе данных систем формируют у водителей чувство ложной уверенности и провоцируют их на совершение манёвров рискованных в конкретных дорожных условиях [1].

Необходимо, что бы для курсантов автошкол при обучении, а также для водителей была доступна информация об особенностях поведения автомобилей с бортовыми системами, повышающими активную безопасность, в разных дорожных условиях. Как правило, в руководствах по эксплуатации автомобилей отсутствуют достаточно подробные сведения об особенностях работы систем активной безопасности в разных дорожных условиях. Знания о особенностях работы отдельных систем, повышающих активную безопасность, позволят водителю принимать правильные решения при управлении автомобилем, что несомненно скажется на безопасности движения. Актуальной задачей является разработка рекомендаций по управлению автомобилем, оснащённым системами, повышающими активную безопасность, в том числе системой курсовой стабилизации, в различных дорожных условиях. Для разработки данных рекомендаций необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований.

В данной статье рассмотрено влияние изменения параметров, характеризующих дорожные условия: коэффициента сцепления, коэффициента сопротивления качению при разных значениях радиуса поворота на заданный показатель эффективности работы системы курсовой стабилизации.

Целью данной статьи является получение информации о эффективности работы системы курсовой стабилизации при движении автомобиля в различных дорожных условиях.

Задачи исследования:

1) Выявить зависимость заданного показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации от величины коэффициента сцепления при движении автомобиля с разными радиусами поворота;

2) Определить зависимость заданного показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации от величины коэффициента сопротивления качению при движении автомобиля с разными радиусами поворота;

3) Рассмотреть влияние величины радиуса поворота при движении автомобиля на заданный показатель эффективности работы системы курсовой стабилизации при разных значениях коэффициентов сцепления и сопротивления качению.

Материалы и методы. При равномерном движении автомобиля по криволинейной траектории на него в горизонтальной плоскости в общем случае действуют центробежная сила инерции, сила сопротивления воздуха, сила сопротивления подъёму, поперечные и продольные реакции дороги на колёса [13, 14]. Движение автомобиля устойчиво пока выполняется неравенство [13]:

$$\sqrt{R_x^2 + R_y^2} < \phi R_z, \tag{1}$$

где R_x, R_y, R_z – соответственно продольная, поперечная и нормальная реакции дороги на колесо автомобиля, Н; φ – коэффициент сцепления.

Из формулы (1) следует, что потеря поперечной устойчивости – боковое скольжение возникает в случае превышения суммарной реакции опорной поверхности на колёса автомобиля, действующей в плоскости дороги, определённого предела, равного силе сцепления. Чем больше продольная реакция, тем при меньшем значении поперечной реакции начинается потеря поперечной устойчивости – боковое скольжение, поэтому ведущие колёса, вследствие наличия значительной продольной силы отталкивания, хуже противостоят боковому скольжению, чем ведомые колёса [13]. Скорость движения автомобиля по криволинейной траектории, при которой начинается поперечное скольжение, называется критической скоростью [13, 14, 15, 16].

В качестве показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации предлагается использовать относительное изменение критической скорости по поперечному скольжению равномерно движущегося по криволинейной траектории с постоянным радиусом кривизны автомобиля при приложении к одному из его колёс тормозного момента

$$k_{эф} = \frac{V_{кр2} - V_{кр1}}{V_{кр1}} \cdot 100\%, \tag{2}$$

где $k_{эф}$ – показатель эффективности работы системы стабилизации траектории, %; $V_{кр1}$; $V_{кр2}$ – критические скорости по поперечному скольжению соответственно в случае отсутствия тормозных моментов на колёсах и в случае приложения тормозного момента к определенному колесу, м/с.

При этом, следует отметить, что в отличие от работы реальной системы курсовой стабилизации, рассматривается случай, когда для создания стабилизирующего момента силы, предотвращающего поперечное скольжение автомобиля, к одному из колёс прикладывается тормозной момент и при этом продольная сила отталкивания на ведущих колёсах принудительно не уменьшается, а увеличивается для компенсации возросшего сопротивления движению и поддержания максимальной скорости при условии отсутствия поперечного скольжения.

В работе рассмотрено движение автомобиля с передними ведущими колёсами. Для создания стабилизирующего момента тормозной момент прикладывается к ведомому заднему внутреннему по отношению к центру поворота колесу. Расчётная схема движения автомобиля по криволинейной траектории приведена на рис.1 [13].

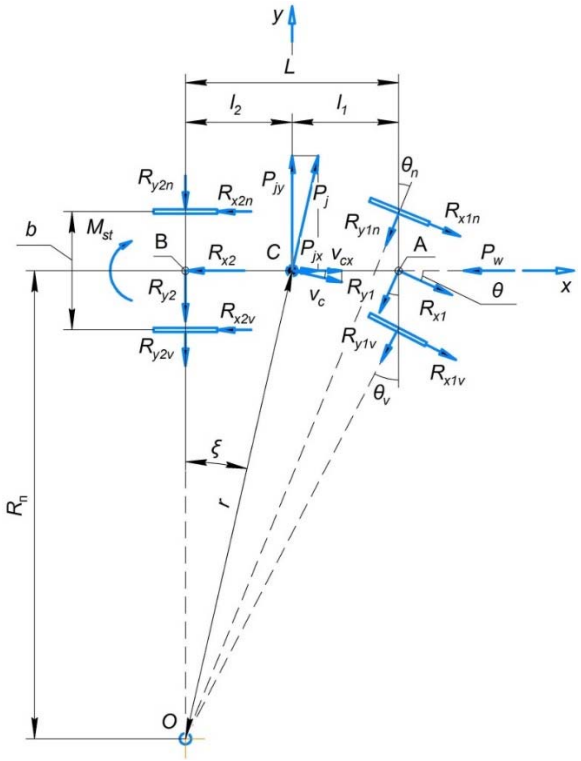


Рис. 1. Расчётная схема движения автомобиля по криволинейной траектории

На рис. 1 имеются следующие обозначения: $R_П$ – радиус поворота, м; r – радиус кривизны траектории, м; O – мгновенный центр поворота; A, B – соответственно центры переднего и заднего мостов; C – центр масс; L – колёсная база, м; l_1, l_2 – соответственно расстояния от осей переднего и заднего мостов до центра масс, м; b – колея автомобиля, м; M_{st} – стабилизирующий момент, Н·м; θ_n, θ_v – соответственно углы поворота наружного и внутреннего по отношению к центру поворота управляемых колес, рад; θ – средний угол поворота управляемых колёс, рад; ξ – угол между отрезками ОВ и ОС, рад; V_c – скорость центра масс, м/с; V_{cx} – продольная составляющая скорости центра масс, м/с; P_j – сила инерции, Н; P_{jy} – поперечная составляющая силы инерции, Н; P_{jx} – продольная составляющая силы инерции, Н; P_w – сила сопротивления воздуха, Н; R_{y1n} – поперечная реакция дороги на переднее наружное по отношению к центру поворота колесо, Н; R_{y1v} – поперечная реакция дороги на переднее внутреннее по отношению к центру поворота колесо, Н; R_{x1n} – продольная реакция дороги на переднее наружное колесо, Н; R_{x1v} – продольная реакция дороги на переднее внутреннее колесо, Н; R_{y1} – суммарная поперечная реакция дороги на передние колёса, Н; R_{x1} – суммарная продольная реакция дороги на передние колёса, Н; R_{y2n} – поперечная реакция дороги на заднее наружное колесо, Н; R_{y2v} – поперечная реакция дороги на заднее внутреннее колесо, Н; R_{x2n} – продольная реакция дороги на заднее наружное колесо, Н; R_{x2v} – продольная реакция дороги на заднее внутреннее колесо, Н; R_{y2} – суммарная поперечная реакция дороги на задние колёса, Н; R_{x2} –суммарная продольная реакция дороги на задние колёса, Н.

Для случая, когда к колёсам автомобиля не приложены тормозные моменты, составлены уравнения динамического равновесия всех сил и моментов, действующих на автомобиль при криволинейном движении в плоскости дороги (рис.1). На основе принципа Даламбера получена система уравнений [13]:

$$\begin{cases} \Sigma X = R_{x1}\cdot\cos(\theta) - R_{y1}\cdot\sin(\theta) - R_{x2} + P_{jx} - P_w = 0; \\ \Sigma Y = -R_{x1}\cdot\sin(\theta) - R_{y1}\cdot\cos(\theta) - R_{y2} + P_{jy} = 0; \\ \Sigma M_c = -R_{x1}\cdot l_1\cdot\sin(\theta) - R_{y1}\cdot l_1\cdot\cos(\theta) + R_{y2}\cdot l_2 = 0. \end{cases}, \tag{3}$$

Приняты следующие допущения:

- значения коэффициента сопротивления качению одинаковы для всех колёс автомобиля;
- левые и правые колеса одноимённых мостов находятся в одинаковых дорожных условиях;
- коэффициенты поперечного и продольного сцепления равны и не зависят от скорости движения;
- дорога ровная, поперечные и продольные уклоны отсутствуют;
- перераспределение нормальных реакций при движении автомобиля не учитывается;
- явление бокового увода колёс не учитывается;
- левые и правые колёса каждого из мостов объединены в одно колесо.

Из геометрических соотношений при небольших углах поворота управляемых колёс средний угол поворота управляемых колёс можно найти по формуле: [13, 14]

$$\theta = \frac{\theta_v + \theta_n}{2} = arctg\left(\frac{L}{R_n}\right); \tag{4}$$

Сила инерции, приложенная к центру масс автомобиля (рис.1) [13]

$$P_j = \frac{m_a\cdot V_c^2}{r}; \tag{5}$$

где m_a – масса автомобиля, кг.

$$r = \sqrt{R_n^2 + l_2^2}\cdot \tag{6}$$

Продольная и поперечная составляющие силы инерции (рис.1)

$$P_{jx} = P_j\cdot\sin(\xi); \tag{7}$$

$$P_{jy} = P_j\cdot\cos(\xi); \tag{8}$$

$$\xi = \text{arctg}\left(\frac{l_2}{R_n}\right); \tag{9}$$

Сила сопротивления воздуха [13,14]

$$P_w = 0{,}5\cdot c_x\cdot\rho_B\cdot F\cdot {V_{cx}}^2 = 0{,}5\cdot c_x\cdot\rho_B\cdot F\cdot(V_c\cdot\cos(\xi))^2, \tag{10}$$

где c_x – коэффициент обтекаемости; $\rho_В$ – плотность воздуха, кг/м^3; F – площадь лобового сопротивления, м^2.

Продольная суммарная реакция дороги на передние ведущие колёса [14]

$$R_{x1} = P_{k1} - P_{f1}, \tag{11}$$

где P_{k1} – окружная сила на передних ведущих колёсах, Н; P_{f1} – сила сопротивления качению передних колёс, Н [13].

$$P_{f1} = \left(\frac{m_a\cdot l_2}{L}\right)\cdot g\cdot f_0\cdot(1 + (0{,}0216\cdot V_c)^2), \tag{12}$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2; f_0 – коэффициент сопротивления качению при движении автомобиля с малой скоростью.

Продольная суммарная реакция дороги на задние ведомые колёса [14]

$$R_{x2} = P_{f2} = \left(\frac{m_a\cdot l_1}{L}\right)\cdot g\cdot f_0\cdot(1 + (0{,}0216\cdot V_c)^2), \tag{13}$$

где P_{f2} – сила сопротивления качению задних колёс, Н.

Для нахождения критической скорости по поперечному скольжению в случае, если к колёсам автомобиля не прикладываются тормозные моменты, с учётом того, что у передних ведущих колёс меньший запас по поперечным реакциям, система уравнений решается при условии полного использования сцепных свойств данных колёс

$$\sqrt{R_{x1}^2 + R_{y1}^2} = \phi \cdot R_{z1} = \phi \cdot \left(\frac{m_a \cdot l_2}{L} \right) \cdot g \cdot \tag{14}$$

При этом $V_c = V_{кр1}$.

Для случая, когда к ведомому заднему внутреннему, по отношению к центру поворота, колесу автомобиля приложен тормозной момент, составлены уравнения динамического равновесия всех сил в проекциях на оси *x* и *y* и моментов относительно центра масс *C* (рис.1). Получена система уравнений:

$$\begin{cases} \Sigma X = R_{x1} \cdot \cos(\theta) - R_{y1} \cdot \sin(\theta) - R_{x2n} - R_{x2v} + P_{jx} - P_w = 0; \\ \Sigma Y = -R_{x1} \cdot \sin(\theta) - R_{y1} \cdot \cos(\theta) - R_{y2n} - R_{y2v} + P_{jy} = 0; \quad ; \\ \Sigma M_c = -R_{x1} \cdot l_1 \cdot \sin(\theta) - R_{y1} \cdot l_1 \cdot \cos(\theta) + R_{y2n} \cdot l_2 + \\ + R_{y2v} \cdot l_2 + R_{x2n} \cdot \left(\frac{b}{2} \right) - R_{x2v} \cdot \left(\frac{b}{2} \right) = 0. \end{cases} \tag{15}$$

Задние левое и правое колёса рассматриваются по отдельности. Продольная реакция дороги на заднее наружное по отношению к центру поворота колесо [14]

$$R_{x2n} = P_{f2n} = \left(\frac{m_a \cdot l_1}{2L} \right) \cdot g \cdot f_0 \cdot (1 + (0{,}0216 \cdot V_c)^2), \tag{16}$$

где P_{f2n} – сила сопротивления качению заднего наружного колёса, Н.

Продольная реакция дороги на заднее внутреннее колесо [14]

$$R_{x2v} = P_{f2v} + P_{tm2v}, \tag{17}$$

где P_{f2v} – сила сопротивления качению заднего внутреннего колёса, Н; P_{tm2v} – тормозная сила заднего внутреннего колёса, Н.

$$P_{f2v} = \left(\frac{m_a \cdot l_1}{2L} \right) \cdot g \cdot f_0 \cdot (1 + (0{,}0216 \cdot V_c)^2)). \tag{18}$$

Для нахождения критической скорости по поперечному скольжению в случае, если к ведомому заднему внутреннему колесу приложен тормозной момент, система уравнений решается при условии (14), а так же при условии полного использования сцепных свойств задних колёс

$$\sqrt{R_{x2v}^2 + R_{y2v}^2} = \phi \cdot R_{z2v} = \varphi \cdot \left(\frac{m_a \cdot l_1}{2L} \right) \cdot g; \tag{19}$$

$$\sqrt{R_{x2n}^2 + R_{y2n}^2} = \phi \cdot R_{z2n} = \varphi \cdot \left(\frac{m_a \cdot l_1}{2L} \right) \cdot g. \tag{20}$$

При этом $V_c = V_{кр2}$.

Для исследования влияния изменения параметров, характеризующих дорожные условия, на заданный показатель эффективности работы системы курсовой стабилизации были проведены численные эксперименты с помощью программного продукта Mathcad 15. Для решения систем алгебраических уравнений был применен метод Левенберга – Марквардта. В качестве объекта исследования был выбран легковой автомобиль Renault Logan, его основные характеристики приведены в таблице.

Основные характеристики автомобиля Renault Logan

Параметр	Снаряжённая масса, кг	Колёсная база, м	Коэффициент обтекаемости	Лобовая площадь, м^2
Значение	1165	2,63	0,36	2,1

Результаты. В результате решения систем уравнений были получены зависимости показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации от параметров, характеризующих дорожные условия. На рис.2 а, б, в, г приведены графики полученных зависимостей показателя эффективности от величины коэффициента сцепления колёс с дорогой при разных значениях коэффициента сопротивления качению и разных значениях радиуса поворота

Из полученных результатов видно, что изменение коэффициента сцепления в заданном диапазоне оказывает значительное влияние не величину показателя эффективности. Характер полученных зависимостей одинаков для всех рассмотренных значений коэффициента сопротивления качению и радиуса поворота. При уменьшении коэффициента сцепления до определённого значения происходит возрастание показателя эффективности, дальнейшее уменьшение коэффициента сцепления приводит к очень быстрому снижению показателя эффективности. При определённом значении коэффициента сцепления показатель эффективности достигает максимальной величины. Из графиков видно, что при увеличении коэффициента сопротивления качению, значение коэффициента сцепления, при котором показатель эффективности достигает максимума, так же возрастает.

На рис. 3 представлены графики полученных зависимостей показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации от величины коэффициента сопротивления качению при разных значениях коэффициента сцепления колёс с опорной поверхностью и разных значениях радиуса поворота.

Из графиков видно, что для всех рассмотренных значений радиуса поворота величина коэффициента сцепления влияет на характер зависимостей показателя эффективности от величины коэффициента сопротивления

качению. При достаточно больших значениях коэффициента сцепления наблюдается возрастание значения показателя эффективности при увеличении величины коэффициента сопротивления качению в заданном диапазоне. В случае, когда коэффициент сцепления принимает достаточно малые значения, происходит уменьшение значения показателя эффективности при возрастании значения коэффициента сопротивления качению. Зависимость нелинейная, с увеличением значения коэффициента сопротивления качению интенсивность уменьшения показателя эффективности повышается. При определённых промежуточных значениях коэффициента сцепления из рассмотренного диапазона при возрастании значения коэффициента сопротивления качению до определённого значения величина показателя эффективности возрастает, при дальнейшем увеличении коэффициента сопротивления качению величина показателя эффективности уменьшается.

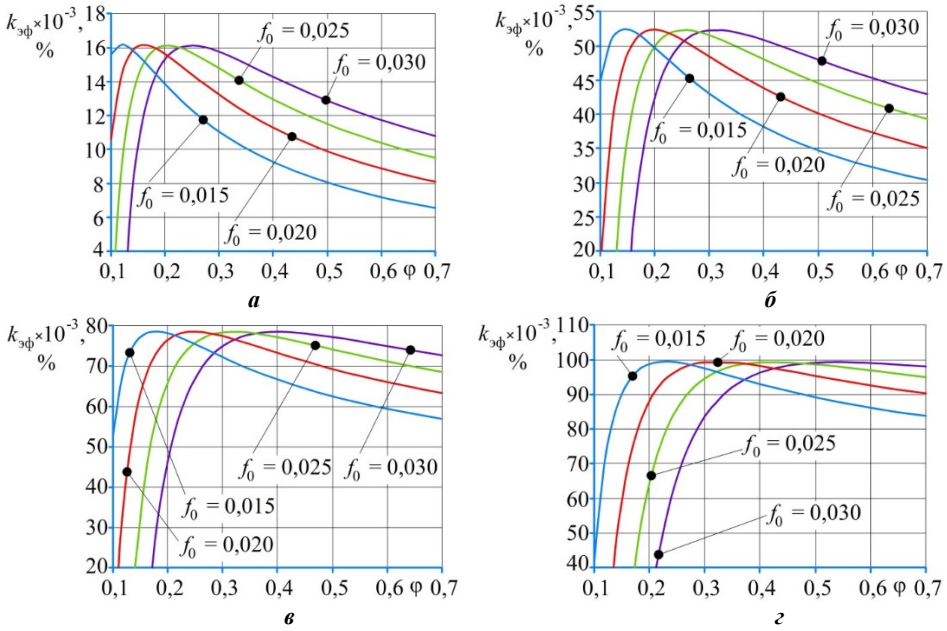


Рис. 2. Графические зависимости показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации от величины коэффициента сцепления при разных значениях коэффициента сопротивления качению и радиуса поворота: а – $R_П$ = 75 м; б – $R_П$ = 100 м; в – $R_П$ = 125 м; г – $R_П$ = 150 м

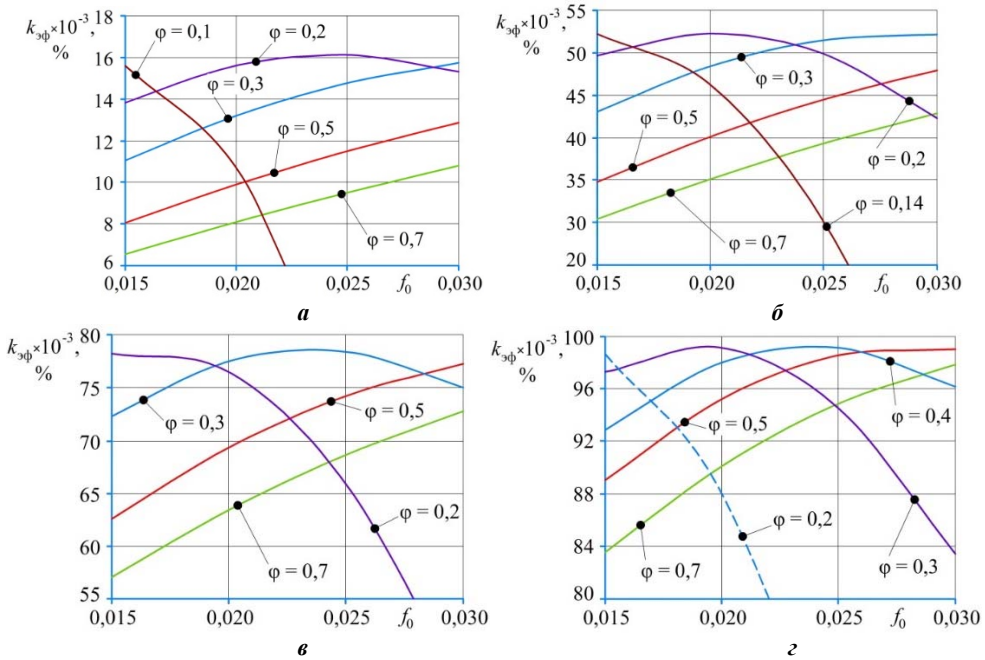


Рис. 3. Графические зависимости показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации от величины коэффициента сопротивления качению при разных значениях коэффициента сцепления и радиуса поворота: а – $R_П$ = 75 м; б – $R_П$ = 100 м; в – $R_П$ = 125 м; г – $R_П$ = 150 м

На рис.4 представлены графики полученных зависимостей показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации от величины радиуса поворота при разных значениях коэффициентов сцепления и сопротивления качению

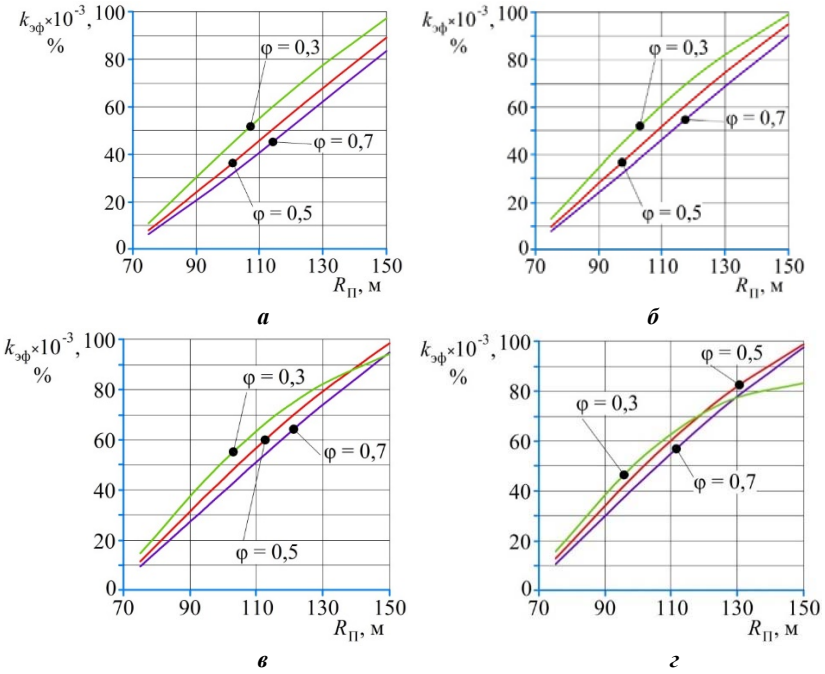


Рис. 4. Графические зависимости показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации от величины радиуса поворота при разных значениях коэффициентов сцепления и сопротивления качению: а – f_0 = 0,015; б – f_0 = 0,020; в – f_0 = 0,025; г – f_0 = 0,030

Из графиков видно, что с увеличением радиуса поворота при всех рассмотренных значениях коэффициентов сцепления и сопротивления качению происходит возрастание величины показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации.

Заключение. В работе в качестве показателя эффективности работы системы курсовой стабилизации автомобиля предлагается использовать относительное изменение критической скорости по поперечному скольжению в случае движении по криволинейной траектории с неизменным радиусом кривизны при приложении к определённому колесу тормозного момента.

Проведённые теоретические исследования позволяют утверждать, что заданный показатель эффективности работы системы курсовой стабилизации при движении автомобиля по криволинейной траектории в значительной степени зависит от параметров, характеризующих дорожные условия: коэффициента сцепления и коэффициента сопротивления качению, а так же от величины радиуса поворота.

Зависимость показателя эффективности от величины коэффициента сцепления нелинейная, при определённом значении коэффициента сцепления из заданного диапазона показатель эффективности достигает максимума. При возрастании коэффициента сопротивления качению, величина коэффициента сцепления, при котором показатель эффективности достигает максимума, увеличивается.

На характер зависимостей показателя эффективности от величины коэффициента сопротивления качению оказывает влияние значение коэффициента сцепления. При достаточно больших значениях коэффициента сцепления показатель эффективности при увеличении величины коэффициента сопротивления качению растёт. При уменьшении коэффициента сцепления, после определённого его значения, происходит уменьшение значения показателя эффективности при возрастании значения коэффициента сопротивления качению. При определённых значениях коэффициента сцепления из рассмотренного диапазона зависимость показателя эффективности от величины коэффициента сопротивления качению имеет выраженный максимум.

При увеличении значения радиуса поворота происходит возрастание величины показателя эффективности при всех рассмотренных значениях коэффициентов сцепления и сопротивления качению.

Полученная информация будет полезна при разработке рекомендаций по вождению автомобиля, оснащённого системой курсовой стабилизации, для курсантов автошкол и водителей, а также при совершенствовании рассмотренной системы.

В данной работе производилось исследование влияния на заданный показатель эффективности работы системы курсовой стабилизации только значений коэффициентов сцепления, сопротивления качению, а так же радиуса поворота при определённом числе принятых допущений. Рассматривалось движение по криволинейной траектории легкового автомобиля с передним приводом. В будущих исследованиях целесообразно расширить номенклатуру параметров, характеризующих дорожные условия, рассмотреть движение автомобилей разных типов и классов, разных компоновок и уменьшить количество принятых допущений.

Список литературы

1. Белов К.А. Системы активной безопасности автомобиля / К.А. Белов // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2014. № 2. С. 165-167.

2. Сотников Е.В. Системы активной безопасности автомобиля / Е.В. Сотников, Е.М. Болотова // ЛУЧШАЯ НАУЧНАЯ СТАТЬЯ 2021 : сборник статей XLV Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 30 ноября 2021 года. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 20-22.

3. Применение стенда с элементами виртуальной реальности в образовательном процессе при изучении систем активной безопасности современного автомобиля / Б. В. Журавский, П. И. Цехош, С. И. Цехош, О. С. Затеева // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, Омск, 24–25 ноября 2022 года. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 644-650.

4. Системы активной безопасности / И.С. Сазонов, М.Л. Петренко, А.С. Мельников [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. 2014. №2 (43). С. 71-81.

5. Евдонин Е.С. Активная и пассивная безопасность автомобиля как основная мера повышения безопасности дорожного движения / Е.С. Евдонин, М.В. Гурьянов // Труды НАМИ. 2010. № 244. С. 36-51.

6. Яковлев, В. Ф. Устройства активной безопасности автомобилей / В. Ф. Яковлев, Л. Ю. Александров, Д. П. Долгих // Альманах современной науки и образования. 2009. № 11-1. С. 94-95.

7. Актуальные проблемы повышения активной безопасности автомобилей путём применения систем электронного контроля устойчивости / А.С. Вашурин, П.С. Мошков, С.Ю. Костин [и др.] // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы : сборник материалов 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров, Нижний Новгород, 18 марта 2016 года – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2016. С. 111-117.

8. Шаповалов С.В. Система активной безопасности на силовых факторах в контакте колёс с опорной поверхностью / С.В. Шаповал // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №2(133). С. 113-123.

9. Жилейкин М.М. Алгоритм работы системы динамической стабилизации для полноприводного двухосного автомобиля с дифференциальной трансмиссией // Известия вузов. Машиностроение. 2014. №11(656). С. 65-74.

10. Жилейкин М.М. Алгоритм работы системы динамической стабилизации для автомобиля 4х4 с подключаемой задней осью / М.М. Жилейкин, А. О. Чулюкин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 4. С. 90-123.

11. Шаповалов С.В. Анализ методов повышения проходимости военных колёсных машин / С.В. Шаповал // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 9. С. 225-231.

12. Сайкин А.М. Математическая модель системы динамической стабилизации беспилотного транспортного средства / А.М. Сайкин, С.Е. Бузников // Интеллектуальные транспортные системы : Сборник трудов Международного автомобильного научного форума МАНФ-2017. Москва: Государственный научный центр Российской Федерации "НАМИ", 2017. С. 155-166.

13. Тарасик В.Н. Теория движения автомобиля: учебник для вузов. Санкт Петербург: БХВ – Петербург, 2006. 478 с.

14. Гришкевич А.И. Автомобили: Теория: учебник для вузов. Минск: Вышэйшая школа, 1986. 208 с.

15. Афанасьев Л.Л. Конструктивная безопасность автомобиля: учеб. пособие для студентов втузов, обучающихся по специальности «Организация дорожного движения» / Л.Л. Афанасьев, А.Б. Дьяков, В.А. Иларионов. М.: Машиностроение, 1983. 212 с.

16. Юхименко В.Ф. Безопасность транспортных средств: учебное пособие / В.Ф. Юхименко, А.А. Яценко. Владивосток: Изд.-во ВГУЭС, 2009. 208 с.

Журавский Борис Викторович, старший преподаватель, ra9meo@mail.ru, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет,

Цехош София Ивановна, канд. техн. наук, доцент, tsehosh.lyubov@yandex.ru, Россия, Омск, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

EFFECTIVENESS OF THE VEHICLE COURSE STABILIZATION SYSTEM IN VARIOUS ROAD CONDITIONS

B.V. Zhuravsky, S.I. Tsehosh

The article is devoted to the current problem of improving road safety. A large number of modern cars are equipped with special systems to improve active safety. The use of these systems makes it possible to reduce the level of accidents on roads. It should be borne in mind that the effectiveness of systems to improve the active safety of a vehicle largely depends on road conditions. The article examines the influence of changes in a number of parameters characterizing road conditions on a given indicator of the effectiveness of the exchange rate stabilization system.

Key words: road conditions, adhesion coefficient, rolling resistance coefficient, turning radius, centrifugal force, lateral slip, lateral stability, critical speed, directional stabilization system, efficiency indicator.

Zhuravsky Boris Viktorovich, senior lecturer, ra9meo@mail.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile and Highway University,

Tsekhosh Sofia Ivanovna, candidate of technical sciences, docent, tsehosh.lyubov@yandex.ru, Russia, Omsk, Siberian State Automobile and Highway University

УДК 343.148.63
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-561-593

СУЩЕСТВЕННЫЕ МОМЕНТЫ АНАЛИЗА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ С УЧАСТИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В.А. Жулай, Е.А. Тарасов, Е.В. Тарасова

В настоящее интеллектуальные транспортные средства и транспортные средства под управлением людей вместе передвигаются по дорогам общего пользования и это приводит к специфическим ДТП и существенно влияет на сложившуюся систему дорожного движения. Делается вывод, что учитывая сложность будущих дорожно-транспортных происшествий, предлагается как можно скорее установить соответствующие стандарты и правила для интеллектуальных транспортных средств, разъяснив юридическую ответственность, которую несет каждый субъект ответственности при авариях с интеллектуальными транспортными средствами, и предложив меры по управлению в соответствии с фактическими требованиями предотвращения аварий и обращения с ними. Разработка применимых методов расследования и идентификации интеллектуальных дорожно-транспортных происшествий могут помочь исследователям более глубоко понять недостатки современных интеллектуальных транспортных средств, сделать улучшения с точки зрения восприятия, принятия решений и исполнения, а также разработать более научные и полные меры по обеспечению безопасности дорожного движения и их улучшению.

Ключевые слова: интеллектуальное транспортное средство, расследование дорожно-транспортных происшествий, автоматизированное вождение, определение ответственности.

В качестве тенденций развития автомобильных технологий будущего интеллектуальные транспортные средства продемонстрировали широкие перспективы применения и получили огромные экономические выгоды. В настоящее интеллектуальные транспортные средства и транспортные средства под управлением людей вместе передвигаются по дорогам общего пользования и это приводит к специфическим ДТП и существенно влияет на сложившуюся систему дорожного движения. Во многих странах нет совершенного законодательства, которое регулирует движение и использование интеллектуальных транспортных средств и это порождает социальные проблемы, в том числе в вопросе восстановительного ремонта автомобилей.

Первая авария с интеллектуальным транспортным средством, в которой интеллектуальный автомобиль Google поцарапал автобус во время столкновения из-за неправильной оценки намерений другого водителя, произошла в феврале 2016 года.

ДПТ с участием интеллектуальных транспортных средств существенно отличаются от “обычных” дорожно-транспортных происшествий. Следовательно, необходимо создать интеллектуальные методы расследования дорожно-транспортных происшествий, а также понять характеристики и механизмы интеллектуальных дорожно-транспортные происшествий.

Этот документ должен включает в себя следующие пункты:

- анализ характеристик дорожно-транспортных происшествий на основе представленных интеллектуальных данных о дорожно-транспортных происшествиях;
- построение новой интеллектуальной системы расследования дорожно-транспортных происшествий на основе существующего опыта и традиционных методов;
- разработка соответствующих рекомендаций по определению ответственности за интеллектуальные дорожно-транспортные происшествия.

Факторы, способствующие интеллектуальным дорожно-транспортным происшествиям. Ограниченные нынешним низким уровнем автоматизации, интеллектуальные транспортные средства неизбежно вступают в конфликт с существующей системой "человек–транспортное средство-дорога". Что касается причинно–следственной связи аварий, то интеллектуальные дорожно–транспортные происшествия имеют три основные характеристики, основанные на идее системной инженерии человек-машина-окружающая среда.

1. Интеллектуальные дорожно-транспортные происшествия в основном вызваны механическими факторами. Неизбежно, что в определенной степени будут существовать технические ограничения, которые могут легко привести к дорожно-транспортным происшествиям из-за технических неполадок. В настоящее время интеллектуальные транспортные средства по-прежнему испытывают трудности с обнаружением и прогнозированием препятствий, что предъявляет более высокие требования к компьютерному алгоритму распознавания изображений и прогнозирования. Различные степени системных нарушений, возникающие в результате возможных атак на компьютерные информационные и коммуникационные системы извне (например, хакеров) или неожиданных ситуаций, таких как малая вероятность системных ошибок, могут привести к ошибкам во взаимодействии между человеком, транспортным средством и дорогой.

2. Человеческий фактор в основном связан с управлением интеллектуальным транспортным средством без соблюдения инструкций. На этапе перехода от неавтономного вождения к полностью автоматическому существующие интеллектуальные транспортные средства не могут обойтись без помощи водителей-людей. Помощь водителей-людей может компенсировать недостатки современной технологии автоматического вождения. Перед переключением с управления человеком на управление машиной следует зарезервировать разумный интервал времени, в противном случае это легко может привести к ДТП, когда водители-люди своевременно не подключаются к процессу управления транспортным средством. Например, расследование происшествия с Тесла в 2016 году установило 7-ми секундный интервал, необходимый интеллектуальному транспортному средству на реагирование и принятие мер для предотвращения опасности, тогда как управление по расследованию неисправностей NHTSA установило, что в большинстве аварий системам/водителям требовалось меньше времени для обнаружения, реагирования и принятия мер (менее 3 секунд). В результате проблема переключения управления между человеком и машиной стала предметом исследований в области интеллектуальных транспортных средств.

3. Факторы окружающей среды, ограничивающие использование интеллектуальных систем. При традиционных дорожно-транспортных происшествиях факторы окружающей среды в основном влияют на получение информации участниками дорожного движения и стабильность работы транспортного средства. Интеллектуальные транспортные средства также не в состоянии избавиться от влияния факторов окружающей среды.

Ключевые вопросы интеллектуального расследования дорожно-транспортных происшествий. Интеллектуальные транспортные средства неизбежно вступают в конфликт с существующей системой "человек–транспортное средство–дорога" из-за их низкого уровня автоматизации. Таким образом, необходимо пересмотреть направленность интеллектуального расследования дорожно-транспортных происшествий. Сочетание традиционного метода расследования дорожно-транспортных происшествий и интеллектуальных характеристик дорожно-транспортных происшествий достаточно хорошо изучена. Уже есть исследования, в которых создана новая система расследования дорожно-транспортных происшествий, где сформулированы основные факторы и постулаты, которые необходимо принимать во внимание при расследование ДТП с участием интеллектуальных транспортных средств.

Методы исследования. В отличие от традиционного расследования дорожно–транспортных происшествий, при расследовании дорожно-транспортных происшествий с использованием интеллектуального транспортного средства больше внимания уделяется тому, может ли интеллектуальное транспортное средство работать правильно до столкновения и может ли взаимодействие человека и компьютера осуществляться в обычном режиме. Беспилотная аэрофотосъемка и видеозапись дорожно-транспортных происшествий необходимы для получения траекторий движения интеллектуальных транспортных средств до столкновения и сценариев риска. Регистратор данных о событиях помогает получить рабочее состояние интеллектуального транспортного средства во время столкновения. Обширные методы расследования помогут следователям получить исчерпывающие причины интеллектуальных дорожно-транспортных происшествий, что способствует точному устранению дефектов интеллектуальных транспортных средств и завершению подтверждения ответственности за интеллектуальные дорожно-транспортные происшествия.

Ключевые вопросы интеллектуального анализа дорожно-транспортных происшествий. Анализ дорожно-транспортных происшествий является важным аргументом для повышения показателей безопасности транспортного средства. Интеллектуальные транспортные средства управляются интеллектуальными системами, а не водителями-людьми. Водители и пассажиры, свободные от управления автомобилем, могут по желанию регулировать свои позы для обеспечения большего комфорта. В центре внимания интеллектуального анализа дорожно-транспортных происшествий стало полное понимание технических дефектов, проблем информационной безопасности и новых проблем пассивной безопасности. Расследование ДТП с участием интеллектуальных транспортных средств включает в себя следующие аспекты:

1. Механизм ДТП. Он являются основой для исследований и разработки интеллектуальных транспортных средств с точки зрения их безопасности. Сценарии вождения с риском дорожно-транспортных происшествий могут быть получены на основе углубленного изучения реальных механизмов дорожно-транспортных происшествий. Новая автомобильная интеллектуальная система должна быть подтверждена реальными испытаниями автомобиля, прежде чем она поступит на рынок. Репрезентативные сценарии испытаний, которые указывают на основные требования, которые должны быть выполнены для применения интеллектуальной системы к транспортному средству, могут быть определены путем анализа сценария аварии. Для испытания на автономное экстренное торможение добавлен сценарий продольного исследования движения пешехода, в котором боковое положение пешехода предполагает смещение последнего на 50% и 25%. Исследования проводятся в дневное и ночное время. В связи с растущим числом аварий на электровелосипедах в России также были добавлены сценарии соответствующего тестирования.

2. Кинематические реакции. Традиционный анализ дорожно-транспортных происшествий фокусируется на результатах аварий после столкновений, таких как динамические реакции на удар и травмы. Кинематические реакции перед столкновением непосредственно показывают, является ли разумным решение о вождении, принятое интеллектуальной системой транспортного средства. Следовательно, кинематическим реакциям перед столкновениями, например траектории движения транспортного средства, следует уделять достаточное внимание при интеллектуальном расследовании дорожно-транспортных происшествий.

3. Технологии пассивной безопасности. Технологии пассивной безопасности транспортных средств должны идти в ногу с развитием интеллектуальных систем транспортных средств. При традиционных дорожно-транспортных происшествиях исследования пассивной безопасности фокусируются на ударопрочности транспортного средства, подушках безопасности (шторках) и т.д. С развитием интеллектуальных транспортных технологий технологии пассивной безопасности также должны стать более интеллектуальными. Анализ эффективности новых технологий пассивной безопасности при интеллектуальных дорожно-транспортных происшествиях и руководство по их совершенствованию стали важными направлениями для будущего интеллектуального анализа дорожно-транспортных происшествий.

Ключевые вопросы интеллектуального определения ответственности за дорожно-транспортные происшествия. Традиционная система определения ответственности за дорожно-транспортные происшествия основана на "принципе вины", и существуют соответствующие решения для таких столкновений между транспортными средствами и другими объектами. Однако в интеллектуальных дорожно-транспортных происшествиях участвуют несколько сторон, и границы ответственности между этими сторонами не ясны, что может привести к недостаточной защите прав потерпевшего. Как проводить идентификацию ответственности за дорожно-транспортные происшествия с использованием интеллектуальных транспортных средств стало важным вопросом, который ограничивает популяризацию и применение интеллектуальных транспортных средств.

Статус иностранного законодательства об интеллектуальных транспортных средствах. Американские законодатели считают, что водители-люди являются главными инициаторами дорожно-транспортных происшествий, поэтому водители-люди должны нести ответственность за несчастные случаи. Интеллектуальный автомобиль управляется системой, когда он находится в режиме автономного вождения. Является ли пользователь по-прежнему водителем? Должны ли водители-люди по-прежнему брать на себя ответственность после аварии? Во многих штатах США положительно отвечают на данный вопрос.

Определение ответственности при интеллектуальных дорожно-транспортных происшествиях в Германии в большей степени основывается на данных о вождении. Некоторые устройства, такие как "черные ящики", необхо-

димы интеллектуальным транспортным средствам для записи подробной информации на разных этапах, например, работает система автономного вождения, водитель-человек начинает вмешиваться, и водитель-человек ведет машину. Таким образом, соответствующая ответственность ложится на человека-водителя, если авария происходит на этапе, когда он или она находится за рулем. Производитель интеллектуального транспортного средства возьмет на себя ответственность, если авария произойдет на стадии, когда работает автономная система вождения (вызывает аварию из-за сбоя системы и т.д.).

Выводы. Интеллектуальность, автоматизация и малый вес – однозначно перспективные векторы будущих исследований в области автомобильного транспорта.

Разработка применимых методов расследования и идентификации интеллектуальных дорожно-транспортных происшествий могут помочь исследователям более глубоко понять недостатки современных интеллектуальных транспортных средств, сделать улучшения с точки зрения восприятия, принятия решений и исполнения, а также разработать более научные и полные меры по обеспечению безопасности дорожного движения и их улучшению. Учитывая сложность будущих дорожно-транспортных происшествий, предлагается как можно скорее установить соответствующие стандарты и правила для интеллектуальных транспортных средств, разъяснив юридическую ответственность, которую несет каждый субъект ответственности при авариях с интеллектуальными транспортными средствами, и предложив меры по управлению в соответствии с фактическими требованиями предотвращения аварий и обращения с ними.

Для тестирования интеллектуального транспорта все еще требуется время.

Список источников

1. Дурнев В.Д., Сапунов С.В., Федюкин В.К. Экспертиза и управление качеством промышленных материалов. СПб.: Питер, 2004. 254 с.

2. Новокщеновой С.М., Виноград М.И. Дефекты стали. Справочник. М.: Металлургия 1984. 199 с.

3. Герасимова Я.П., Ежов А.А., Маресев М.И. Изломы конструкционных сталей: Справочник. М.: Металлургия, 1987. 272 с.

4. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения: справочник / Б.К Барахтин, А.М. Немец; под ред. И.П. Калинкина. СПб: Профессионал, 2006. 487 с.

5. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справочник в 3 т: / Под ред. Рахштадта А.Г. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. Т. 1: Методы испытаний и исследования. 2004. 687 с.

Жулай Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры, zhulai@vgasu.vrn.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

Тарасов Евгений Александрович, канд. техн. наук, доцент, 382652@mail.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

Тарасова Елена Владимировна, преподаватель, elena.tarasova@ro.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет

THE ESSENTIAL POINTS OF THE ANALYSIS OF ROAD ACCIDENTS WITH THE PARTICIPATION OF INTELLIGENT VEHICLES

V.A. Zhulai, E.A. Tarasov, E.V. Tarasova

Currently, intelligent vehicles and vehicles driven by people move together on public roads and this leads to specific accidents and significantly affects the existing traffic system. It is concluded that, given the complexity of future road accidents, it is proposed to establish appropriate standards and rules for intelligent vehicles as soon as possible, clarifying the legal responsibility that each subject of responsibility bears in accidents with intelligent vehicles, and proposing management measures in accordance with the actual requirements of accident prevention and communication with them. The development of applicable methods for the investigation and identification of intelligent traffic accidents can help researchers better understand the shortcomings of modern intelligent vehicles, make improvements in terms of perception, decision-making and implementation, as well as develop more scientific and comprehensive measures to ensure road safety and improve them.

Key words: intelligent vehicle; investigation of traffic accidents; automated driving; definition of responsibility.

Zhulai Vladimir Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, zhulai@vgasu.vrn.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Tarasov Evgeny Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, 382652@mail.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Tarasova Elena Vladimirovna, teacher, elena.tarasova@ro.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University

УДК 621.833
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-564-568

ПОДГОТОВКА ЭКИПАЖЕЙ КОМАНДНО-ШТАБНЫХ МАШИН ДЛЯ УЧАСТИЯ В ЭТАПЕ «ВОЕНИЗИРОВАННАЯ ЭСТАФЕТА» КОНКУРСА «УВЕРЕННЫЙ ПРИЁМ» В РАМКАХ АРМЕЙСКИХ МЕЖДУНАРОДНЫХ ИГР

И.Н. Репьев, Р.В. Багреев, А. И. Сысойкин, М.В. Ашлапов, Д. И. Репьева, О.П. Тевс, Р.А. Попов, О.В. Фроловский

В статье рассматриваются последовательность этапов отбора, подготовки и дальнейшему совершенствованию порядка отбора и организации подготовки экипажей командно-штабных машин Р-149АКШ1 для участия в военизированной эстафете конкурса «Уверенный прием», проводимого в ходе Армейских международных игр. Предлагается использовать (внедрить), применяемую методику в воинских частях Вооруженных сил Российской Федерации, военных учебных центрах высших учебных заведениях, для качественной подготовки специалистов этой области, а также для проверки практических навыков специалистов КШМ игровым способом и для организации и проведения игр (конкурсов) среди высших учебных заведений Российской Федерации.

Ключевые слова: уверенный прием, отбор, командно-штабная машина, военизированная эстафета.

С каждым годом Армейские международные игры набирают все большую популярность, растет число участников, количество государств, направляющих свои команды и принимавших конкурсы.

В странах-участницах серьезно относятся к подготовке своих команд, используя передовые методики. С каждым годом команды, выступающие на конкурсе, становятся сильнее не только в физическом и психологическом отношении, но и в профессиональном плане как специалисты связи, составляя серьезную конкуренцию нашей команде. Кроме того и полученные результаты анализа выступления экипажей командно-штабных машин (далее – КШМ) [1] свидетельствуют о необходимости проведения дальнейших исследований по совершенствованию организации подготовки команды.

Согласно требований Положения о конкурсе [2] два экипажа КШМ включают в свой состав восемь военнослужащих (6 – основных, 2 – запасных). В состав каждого экипажа входит начальник КШМ, радиотелефонист, водитель-электрик и запасной член экипажа.

В состав экипажей КШМ необходимо включать военнослужащих (в том числе офицеров), профессионально подготовленных (по условиям выполнения этапа «Военизированная эстафета», с разрядами по легкой атлетике, офицерскому многоборью ВТ-4 и т. д.), с обязательным медицинским освидетельствованием, результатами психологического обследования, служебными характеристиками и ведомостями сдачи физической подготовки [3].

Особое внимание следует обратить на наличие у водителей документов, подтверждающих право управления транспортным средством и медицинской справки.

Подготовка экипажей КШМ к первому этапу Всеармейских соревнований ВС РФ (2 этап) осуществляется в течение двух - трех месяцев [2].

Второй этап подготовки включает следующие мероприятия:

- физическая подготовка и изучение приемов преодоления полосы препятствий;
- теоретическая и практическая подготовка всех членов экипажей:
- изучение Положения о конкурсе;
- изучение, устройства и тактико-технических характеристик КШМ КаМАЗ, ее составных частей, порядка свертывания и развертывания КШМ, правил установления радиосвязи, в том числе и действий при возникновении внештатных ситуаций;
- подготовка водителей по изучению устройства, тактико-технических характеристик автомобиля КаМАЗ, агрегата бензоэлектрического, системы электропитания КШМ, практическая отработка вождения по преодолению препятствий конкурса;
- огневая подготовка с практическими стрельбами не менее четырех раз в неделю;
- практическая отработка по элементам упражнений этапа «Военизированная эстафета» под руководством преподавателей;
- отработка всех элементов этапа «Военизированная эстафета» конкурса в комплексе.

План подготовки экипажей КШМ к первому этапу Всеармейских соревнований ВС РФ (вариант), состоит из трех типовых месяцев, каждый из которых включает четыре типовые недели [3].

В первую и вторую недели первого месяца подготовки участники команды изучают Положение о конкурсе «Уверенный прием», перечень нарушений и количество штрафных минут за них в ходе отработки этапа «Военизированная эстафета» согласно Положения о конкурсе, предназначение, состав и возможности оборудования Р-149АКШ1, порядок ее развертывания, эксплуатации в различных режимах и свертывания, кроме того проводится и теоретическая подготовка водителей КаМАЗ (изучение алгоритма проведения контрольного осмотра, простейших неисправностей и порядка проведения регулировочных работ на КаМАЗ, решение задач по правилам дорожного движения, решение тестов по технической подготовке).

В ходе проведения занятий по огневой подготовке (теория) рассматриваются вопросы, касающиеся организационного и теоретического разделов огневой подготовки: требований безопасности, теории и основ стрельбы, включает в себя упражнения для отработки приемов стрельбы и приемы манипуляций с оружием. Проводимые на данном этапе занятия рассчитаны на привитие первоначальных навыков в огневой подготовке военнослужащему и определение направления его дальнейшего совершенствования на плановых занятиях.

В ходе теоретической подготовки водителей изучить порядок начисления штрафных баллов, порядок выполнения упражнений (совершение марша), алгоритм проведения контрольного осмотра, изучить простейшие неисправности и порядок проведения регулировочных работ для КаМАЗ. Кроме того, повторить (изучить) из Курса вождения-19 подготовительные упражнения № 1, 2, 3, 4.

В третью и четвертую неделю , в том числе с использованием методического фильма [4], формируются практические навыки по элементам при работе на средствах связи и коммутационном оборудовании, развертывании

антенно-мачтовых устройств и системы электропитания КШМ, прокладке линий дистанционного управления, настройке Р-168-5УН1.

С водителями, под руководством подготовленных инструкторов, практически отрабатываются и тренируются скоростное руление, выполнение упражнений по практическому вождению на подготовленной площадке, практическое выполнение операций по контрольному осмотру, техническому обслуживанию и выполнению регулировочных работ. Основной целью подготовки является выполнения упражнений по вождению без ошибок.

Особое внимание уделить выполнению упражнения «змейки», при отработке которого необходимо постепенно сокращать расстояние между стойками с 9,5 метров до 8,5 метров.

Занятия проводить не реже двух раз в неделю с 9 до 18 часов чередуя практическое вождение и занятия по технической подготовке, с привлечением подготовленных специалистов.

Кроме того, с целью совершенствования полученных навыков необходимо усложнять условия выполнения упражнений (например, обучение водителей выполнять все упражнения задним ходом, в противогазе и т.д.)

Проводится второй этап по огневой подготовке, в ходе которого военнослужащие обучаются применению оружия при стрельбе на фоне тактической обстановки. После обучения на каждом этапе выполняется контрольное упражнение, и производится отбор лучших стрелков.

Упражнения боевых стрельб в составе экипажа отрабатываются только после успешного прохождения обучаемыми военнослужащими первых двух этапов, и последовательно – сначала в индивидуально, затем в составе экипажа.

В первую неделю второго месяца подготовки с экипажами продолжаются тренировки выполнения упражнений этапа по элементам, развертывания и свертывания КШМ согласно алгоритма действий членов экипажа, с разучиванием последовательности действий каждого члена экипажа, огневая подготовка (стрельба из АК-74) и практическое вождение с водителями, после чего на протяжении второй, третьей и четвертой недель второго месяца и третьего месяца осуществляется тренировка экипажей КШМ в выполнении упражнений этапа «Военизированная эстафета» в комплексе.

Кроме того, экипажи КШМ, отобранные по результатам контрольных занятий, на четвертой неделе третьего месяца второго этапа подготовки команды к конкурсу участвуют в Первом этапе Всеармейских соревнований.

Тренировочный сбор экипажей КШМ, отборочные соревнования, интенсивная подготовка и определение экипажей, которые войдут в состав команды для участия в конкурсе осуществляется на третьем этапе [3].

На данном этапе, с целью резервирования экипажей КШМ, в подготовке участвуют четыре экипажа, два из которых исключаются из команды по результатам отборочных соревнований.

На третьем этапе в процессе тренировочного сбора и интенсивной подготовки совершенствуются практические навыки в выполнении как отдельных элементов этапа «Военизированная эстафета», так и в комплексе. Кроме того, создаются проблемные ситуации, с целью формирования у членов экипажа навыков и способностей устранения возможных неисправностей при возникновении внештатных ситуаций.

План подготовки экипажей КШМ к конкурсу в ходе третьего этапа (вариант) состоит их трех этапов и включает три типовых месяца, каждый из которых включает четыре типовые недели [3].

На первом месяце подготовки третьего этапа в течение первой недели упражнение отрабатывается по элементам, после чего на протяжении второй, в течение третьей и четвертой недели осуществляется отработка упражнений этапа «Военизированная эстафета» в комплексе.

На протяжении второго месяца идет подготовка в условиях повышенной физической нагрузки, намеренного введения различных проблемных ситуаций, с целью формирования у членов экипажа навыков и способностей устранения возможных неисправностей при возникновении внештатных ситуаций.

На третьем месяце формируется составы экипажей КШМ для участия в конкурсе. В течение первой недели проводится интенсивная подготовкаи контрольные занятия под руководством вышестоящего штаба, с целью формирования, в том числе на основе рекомендаций психолога и результатов анализа психологической службы, экипажей КШМ для участия в конкурсе.

В течение второй недели проводится интенсивная подготовка отобранных на конкурс экипажей, смотр готовности, инструктаж по технике безопасности и убытие в составе команды на территорию принимающей стороны.

Тренировки на третьей и четвертой неделе третьей осуществляется на базе принимающей стороны. Для их качественного проведения экипажи КШМ осуществляют прием у принимающей стороны стрелкового оружия (АК-74), бронежилетов, касок, двух командно-штабных машин Р-149АКШ1, радиостанций и имущества с составлением актов технического состояния установленным порядком [5].

В ходе подготовки экипажей КШМ обратить особое внимание на тренировки их действий в смоделированных условиях и нештатных ситуациях, на действия экипажей и быстрой их адаптации к сложившейся критической ситуации, на психологическое сопровождение участников в процессе подготовки команды к конкурсу.

Окончательное формирование экипажей КШМ для участия в Международном конкурсе «Уверенный прием» осуществляется на основе рекомендаций психолога и результатов анализа психологической службы, а также на основе анализа результатов, продемонстрированных на отборочных соревнованиях по окончанию третьего этапа подготовки.

Список литературы

1. Результаты выступления экипажей командно-штабных машин в конкурсе «Уверенный приём» в ходе «Армейских международных игр». Москва. [Электронный ресурс] URL: http:/armygames2022.mil.ru/confident_reception_ru (дата обращения: 10.05.2023).

2. Положение о проведении конкурса «Уверенный приём» в ходе соревнований «Армейские международные игры -2022». М.: Главное управление связи, 2022. 93 с.

3. Методические рекомендации по отбору и подготовке команды к конкурсу «Уверенный приём», проводимого в ходе Армейских международных игр. Санкт-Петербург: Военная академия связи, 2021. 157 с.

4. Методический фильм «О проведении конкурса специалистов связи «Уверенный приём», проводимого в рамках Армейских международных игр, судейства на нем и порядка начисления штрафных баллов на каждом этапе конкурса» (на русском языке). Санкт-Петербург: ВАС, 2022. 1,84 Гб. [Электронный ресурс] URL: http:/armygames2022.mil.ru (дата обращения: 10.05.2023).

5. «Альбом-формуляр конкурса специалистов связи «Уверенный приём», проводимого в ходе Армейских международных игр». Санкт-Петербург: Военная академия связи, 2021. 108 с.

Репьев Игорь Николаевич, канд. воен. наук, доцент, repev85@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Сысойкин Андрей Игоревич, слушатель, andrey_sysoikin@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Ашлапов Михаил Владимирович, канд. техн. наук, доцент, vas@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Репьева Дарья Игоревна, студент, a_sentient_being@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Тевс Олег Павлович, канд. воен. наук, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Багреев Роман Витальевич, канд. воен. наук, начальник кафедры, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Попов Рустам Алексеевич, канд. воен. наук, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,

Фроловский Олег Владимирович, слушатель, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного

TRAINING OF CREWS OF COMMAND AND STAFF VEHICLES FOR PARTICIPATION IN THE "PARAMILITARIZED RELAY RACE" STAGE OF THE "CONFIDENT RECEPTION" COMPETITION AS PART OF THE INTERNATIONAL ARMY GAMES.

I.N. Repiev, R.V. Bagreev, A. I. Sysoykin, D. I. Repeva, O.P. Teves, R.A. Popov, O.V. Frolovsky

The article discusses the sequence of stages of selection, preparation and further improvement of the selection and organization of training of crews of R-149AKSH1 command and staff vehicles for participation in the paramilitary relay race of the "Confident Reception" competition held during the International Army Games. It is proposed to use (introduce) the methodology used in the military units of the Armed Forces of the Russian Federation, military training centers of higher educational institutions, for high-quality training of specialists in this field, as well as for testing the practical skills of KShM specialists in a game way and for organizing and holding games (competitions) among higher educational institutions of the Russian Federation.

Key words: confident reception, selection, command and staff vehicle, paramilitary relay race.

Repyev Igor Nikolaevich, candidate of military sciences, docent, repev85@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Sysoikin Andrey Igorevich, listener, andrey_sysoikin@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Repeva Daria Igorevna, student, a_sentient_being@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Bagreev Roman Vitalievich, candidate of military sciences, head of the department, vas@mil.ru, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Tevs Oleg Pavlovich, candidate of military sciences, docent, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Popov Rustam Alekseevich, candidate of military sciences, docent, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny,

Frolovsky Oleg Vladimirovich, listener, Russia, St. Petersburg, Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny

МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.45.018.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-567-568

АНАЛИЗ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

В.А. Крюков, Д.А. Тюменев

В статье описаны назначение и функции трубопроводной арматуры, приводов и испытательных стендов для электроприводов трубопроводной арматоры. Рассмотрены испытательные стенды различных производителей. Выявлены достоинства и недостатки стендов. Определены направления совершенствования испытательных стендов.

Ключевые слова: трубопроводная арматура, электропривод, испытательный стенд, крутящий момент.

Трубопроводная арматура – специальный механизм трубопровода, который позволяет управлять потоками вещества за счет изменения площади поперечного сечения. Всего выделяют 7 видов таких изделий по назначению [1, 2]: запорная, обратная, предохранительная, распределительно-смесительная, регулирующая, разделительная (фазоразделительная), отключающая.

1. Запорная арматура – представлена задвижками, кранами, заслонками и вентилями. Обеспечивает полное прекращение движения рабочей жидкости в трубах для ее спуска в среду, либо для поступления в контрольные и измерительные приборы.

2. Обратная арматура – арматура, предназначенная для автоматического прекращения обратного потока рабочей среды.

3. Предохранительная арматура – представлена предохранительными и перепускными клапанами, а также мембранными предохранителями. При повышении давления в сосуде выше нормы обеспечивает автоматическое открытие клапана и сброс лишнего вещества.

4. Распределительно-смесительная арматура – представлена в виде специальных кранов-смесителей, которые распределяют потоки, и клапанов. Обеспечивает смешивание различных потоков рабочего вещества в один, либо разделяет один поток на несколько потоков, идущих в разных направлениях.

5. Регулирующая арматура – представлена вентилями, саморегулирующимися клапанами, конденсатоотводчиками и специальными приборами, которые регулируют необходимый уровень потока. Обеспечивает возможность изменения температуры, напора, давления и расхода вещества в определенном агрегатном состоянии.

6. Разделительная арматура (фазоразделительная арматура) – представлена маслоотделителями, вантузами и конденсатоотводчиками. Служит для автоматического разделения фаз рабочего вещества, которое находится в разных агрегатных состояниях, и их удаления.

7. Отключающая арматура – арматура, предназначенная для перекрытия потока рабочей среды при превышении заданной величины скорости её течения за счет изменения перепада давления на чувствительном элементе, либо в случае изменения заданной величины давления.

Используется также комбинированная арматура, совмещающая несколько функций, например, запорно-регулирующая, запорно-обратная и другие.

Управление трубопроводной арматурой в зависимости от задач, выполняемых ею, степени автоматизации системы, места ее расположения и используемого источника энергии может осуществляться различными способами. При оценке способа управления принципиальное значение имеет и то, как определяется момент подачи командного сигнала на привод – приборами или оператором. С учетом этого фактора можно выделить следующие основные способы управления арматурой: автоматическое, ручное и механизированное управление. Чаще всего для управления трубопроводной арматурой применяется автоматический способ и для этого существуют несколько видов приводов: электроприводы, пневмоприводы и гидроприводы. Электроприводы используются для дистанционного управления арматурой, её открытия и закрытия, а также для определения положения арматуры. Широкое применение электропривода для управления арматурой объясняется рядом его достоинств и преимуществ по сравнению с другими видами приводов (пневмо- и гидроприводов). Он может обеспечивать централизованное управление любыми типами и классами арматуры, способен обслуживать арматуру разных размеров условного прохода и требует подвода только одного вида энергии. Электроприводы состоят из двигателя, редуктора, ручного дублёра и системы управления (рис. 1) [3, 4, 5].

Испытания приводов – необходимый и основной метод определения их технических возможностей с целью проверки соответствия качества изделий требованиям технических условий и установления показателей надежности. Необходимость испытаний обусловлена требованиями подтверждения безопасности и заявленных функциональных характеристик продукции. В зависимости от цели, испытания делятся на контрольные, исследовательские и ресурсные. По срокам проведения различают ускоренные и неускоренные испытания, по методу проведения – разрушающие и неразрушающие [6].

Контрольные испытания предназначены для контроля качества продукции. К ним относятся:

предварительные испытания, которые проводят для решения вопроса о возможности предъявления продукции на государственные испытания;

государственные испытания, которые проводят для решения вопроса о возможности производства или эксплуатации объекта;

приемо-сдаточные испытания, которые осуществляет завод-изготовитель;

периодические испытания готовой продукции, которые проводят для контроля стабильности технологического процесса;

типовые испытания, которые проводят для проверки эффективности внесенных изменений и сравнения качества изделия.

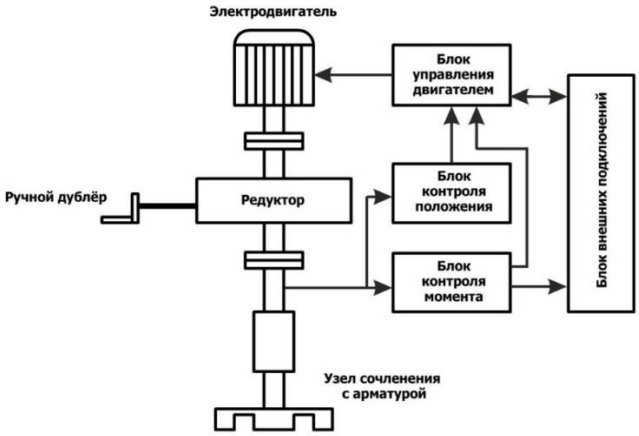


Рис. 1. Блок-схема электропривода трубопроводной арматуры

На последних стадиях производства электроприводов проводят испытания на испытательных стендах согласно программе и методике испытаний.

Стенды предназначены для проведения испытаний, проверки основных параметров и получения данных для построения графика настройки муфты электроприводов при серийном производстве или входном контроле.

Современный рынок характеризуется большим разнообразием производителей электроприводов, а также испытательных стендов. К основным производителям стендов для испытания электроприводов относятся:

компания по производству электроприводов AUMA;

Пензенское конструкторско-технологическое бюро арматуростроения (ПКТБА);

Томский завод электроприводов АО «ТОМЗЭЛ»;

завод АО «Тулаэлектропривод».

Несмотря на большое число работ, посвященных как проектированию и исследованию собственно трубопроводной арматуры [1, 7, 8], и её испытаниям [9, 10, 11, 12], выбор соответствующего оборудования для проведения испытаний затрудняется из-за отсутствия сравнительной характеристики стендов, выпускаемых в настоящее время отечественными производителями. Целью настоящей статьи является обзор существующих стендов для испытания трубопроводной арматуры, их возможностей, достоинств и недостатков.

Испытательный стенд PV 1236 фирмы *AUMA* (рис. 2) позволяет проводить механические и электрические испытания, а также калибровку многооборотных приводов AUMA типа SA и неполнооборотных приводов типа SG [13]. За счет использования стенда PV 1236 испытания, которые ранее выполнялись только производителем электропривода, теперь могут проводиться прямо по месту установки оборудования. В частности, это позволяет провести перекалибровку привода после его модернизации или ремонта.

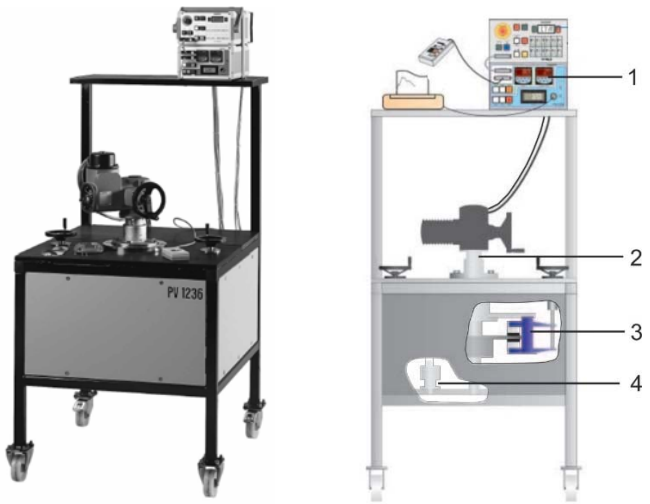


Рис. 2. Стенд AUMA PV 1236

Стенд состоит из измерительного модуля 1, с помощью которого осуществляется анализ сигналов, регистрируемых датчиками стенда, а также подача питания и управление приводом. Для установки привода используется узел монтажного фланца 2. Тормозная система 3 содержит дисковый тормоз с двумя суппортами. Каждый суппорт может управляться отдельно с помощью ручного маховика. Крутящий момент, развиваемый тестируемым приводом, передается на датчик усилия с помощью измерительного рычага. Для измерения крутящего момента привод должен быть остановлен путем торможения его выходного органа. Суппорт тормоза, установленный в измерительном стенде, может настраиваться произвольно с помощью двух ручных маховиков. Крутящий момент величиной до 500 Н·м регистрируется в нескольких измерительных диапазонах. Изменение измерительного диапазона осуществляется за счет удлинения или укорачивания измерительного рычага, на котором закреплен тормоз. Инкрементный датчик скорости 4 регистрирует выходную скорость и измеряет число оборотов на ход или угол поворота.

Измеряемые характеристики и функции стенда:

калибровка системы ограничения крутящего момента;

измерение максимального крутящего момента привода;

настройка концевых выключателей;

измерение выходной частоты вращения;

контроль и индикация срабатывания выключателей.

Технические характеристики стенда указаны в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики стенда AUMA PV 1236

Параметр	Значение
Электропитание, В/Гц	400/50
Потребляемая мощность, кВт	7,5
Габаритные размеры стенда (ДхШхВ), мм	905x790x870
Масса стенда, кг	250

Достоинствами стенда AUMA PV 1236 являются:

мобильная и компактная конструкция испытательного стенда;

удобная и быстрая калибровка моментных выключателей;

испытания могут проводиться прямо по месту установки оборудования.

Стенд ПКТБА-СИ-ЭП-1 (рис. 3) используется для проверки и настройки двусторонней муфты ограничения крутящего момента и датчика положения многооборотных электроприводов с электромеханическим и электронным (интеллектуальным) управлением [14]. Тип присоединения испытываемого изделия: А, Б, В, Г, Д. Величина замеряемого крутящего момента: 100…10000 Н·м.

Рис. 3. Стенд ПКТБА-СИ-ЭП-1

Измеряемые характеристики и функции стенда:

измерение числа оборотов и частоты вращения выходного вала электропривода;

нагружение испытываемого электропривода тормозным моментом от нуля до максимального момента настройки двусторонней муфты ограничения крутящего момента электропривода $M_{\max}$ на всем участке движения от зоны закрытия до зоны открытия и наоборот;

имитация работы электропривода под нагрузкой на запорной арматуре;

снятие вольтамперных характеристик электродвигателя привода во время работы.

Достоинствами стенда ПКТБА-СИ-ЭП-1 являются:

пневматический дисковый тормоз в составе стенда, который моделирует реальные условия работы электропривода при управлении затвором арматуры;

исключение влияния человеческого фактора на результаты испытаний;

система управления стендом, которая базируется на программируемом логическом контроллере и сенсорной панели оператора;

в комплект стенда входят сменные фланцы и переходники для установки вышеперечисленных электроприводов.

Технические характеристики стенда указаны в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики стенда ПКТБА-СИ-ЭП-1

Параметр	Значение
Электропитание, В/Гц	400/50
Потребляемая мощность, кВт	0,37…11
Габаритные размеры стенда (ДхШхВ), мм	1300х1250х1190
Масса стенда, кг	1760

Рис. 4. Стенд АО «ТОМЗЭЛ» 1021.25.100.00.00.000

На последней стадии производства для проверки соответствия качества изделий требованиям технических условий ТУ 3791-012-00139181-2003 проводят приемо-сдаточные испытания на стенде АО «ТОМЗЭЛ» 1021.25.100.00.00.000 (рис. 4) согласно программе и методике приемо-сдаточных испытаний ПМ1 3791-012-00139181-2003 [15].

Измеряемые характеристики и функции стенда:

измерение и настройка крутящего момента электропривода;

измерение числа оборотов и частоты вращения выходного вала электропривода;

снятие вольтамперных характеристик электропривода.

Испытательный стенд 1021.25.100.00.00.000 состоит из следующих элементов:

нагрузочное устройство, с помощью которого оператор создает нагрузку на выходном звене электропривода;

упор, необходимый для передачи усилия с нагрузочного устройства на датчик измерительного устройства;

установочная платформа, на которой закрепляется электропривод;

измерительное устройство, отображающее на дисплее крутящий момент.

Процесс работы на стенде происходит следующим образом. Оператор устанавливает электропривод на установочную площадку нагрузочного устройства, закрепляет электропривод с помощью шпилек и гаек, далее производит подключение и проверку цепей питания электропривода согласно инструкции по эксплуатации электропривода. Проверку ограничения крутящего момента на выходном звене изделия оператор проводит в следующей последовательности:

а) задать в блоке управления величину ограничения крутящего момента равную значению нижней границы диапазона для обоих направлений вращения выходного звена;

б) включить изделие и нагружающим устройством стенда плавно увеличивать нагрузку на выходном звене изделия до момента остановки вращения выходного звена и отключения изделия по сигналу «Отключение по превышению заданного крутящего момента (муфта)»;

в) таким же образом провести проверку изделия для противоположного направления вращения выходного звена, предварительно сняв нагрузку с выходного звена изделия. Повторить в той же последовательности проверку изделия для значений момента в 1/3, 1/2, 2/3 от максимального момента и в верхней границе диапазона ограничения момента;

г) записать в журнал испытаний показания измерительного устройства.

Достоинствами стенда АО «ТОМЗЭЛ» являются:

удобное нагрузочное устройство, с помощью которого оператор создает нагрузку на выходном звене электропривода;

измерительное устройство, отображающее на дисплее крутящий момент;

система управления стендом базируется на программируемом логическом контроллере и панели оператора.

Технические характеристики стенда указаны в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики стенда АО «ТОМЗЭЛ»

Параметр	Значение
Электропитание, В/Гц	400/50
Потребляемая мощность, кВт	7,5
Габаритные размеры стенда (ДхШхВ), мм	1200х1150х1500
Масса стенда, кг	1550

Стенд «М» АО «Тулаэлектропривод» (рис. 5) предназначен для испытаний, обкатки и настройки электроприводов с фланцем «М» всех конструктивных схем [16].

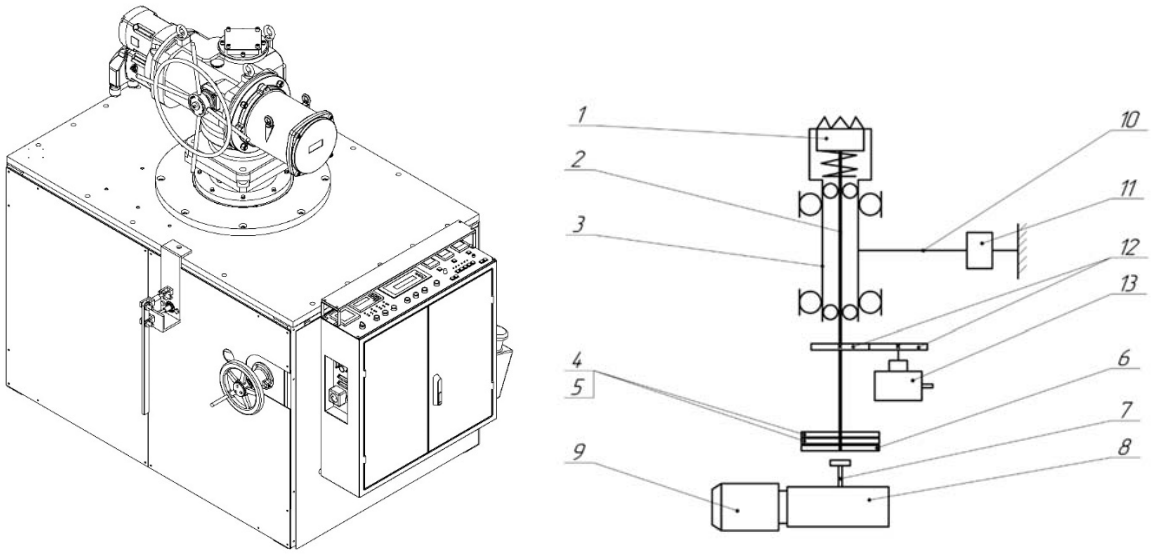


Рис. 5. Стенд «М» АО «Тулаэлектропривод» и его кинематическая схема

Измеряемые характеристики и функции стенда:
измерение и настройка крутящего момента электропривода;
измерение числа оборотов и частоты вращения выходного вала электропривода;
снятие вольтамперных характеристик электропривода;
обкатка электропривода.

Стенд работает следующим образом. Испытуемый электропривод устанавливается на столе стенда и закрепляется шпильками и гайками. Кулачковая муфта привода при этом сопрягается с ответной муфтой стенда 1. Соответствующими кабелями подключается система управления электропривода с электрошкафом стенда. При включении соответствующих кнопок на пульте управления включается электродвигатель электропривода, при этом стенд работает в режиме холостого хода. В режиме холостого хода направление вращения электропривода изменяется соответствующими кнопками на пульте управления. Для определения величины крутящего момента, на который настроена муфта электропривода, нажатием соответствующей кнопки включается электродвигатель 9 привода сближения дисков. Привод сближения дисков состоит из электродвигателя 9, вал которого через муфту жестко соединён с червяком червячного редуктора 8. Червячное колесо редуктора имеет центральное резьбовое отверстие, которое взаимодействует с толкателем 7, перемещающим диск 6. Диск 6 взаимно сближает диски 4 и 5 с силой, обеспечивающей создание необходимого тормозного момента, плавно останавливающего вращение вала стенда и выходного вала электропривода. Кинематика сближения тормозных дисков рассчитана таким образом, что муфта электропривода срабатывает за 3…5 с. Момент силы трения, развиваемый тормозной муфтой, передаётся через вал 2 выходному валу электропривода и вследствие возникающего реактивного момента, поворачивает корпус 3 и рычаг 10, который взаимодействует с тензодатчиком 11. Узел измерения угла поворота вала смонтирован на кронштейне и состоит из ведущей и ведомой шестерни 12 и датчика 13.

Достоинствами стенда «М» АО «Тулаэлектропривод» являются:
механический дисковый тормоз в составе стенда, который моделирует реальные условия работы электропривода при управлении затвором арматуры;
исключение влияния человеческого фактора на результаты испытаний;
возможна обкатка электропривода перед отправкой заказчику.

Технические характеристики стенда указаны в табл. 4.

Таблица 4

Технические характеристики стенда «М» АО «Тулаэлектропривод»

Параметр	Значение
Электропитание, В/Гц	380/50
Потребляемая мощность, кВт	7,5
Габаритные размеры стенда (ДхШхВ), мм	860x820x1010
Масса стенда, кг	550

В процессе работы стендов АО «Тулаэлектропривод» были выявлены следующие недостатки стенда «М»:
колебания показаний крутящего момента при испытании привода;
неточность дозирования усилия при испытании;
возможность возникновения лишних усилий при тормозной нагрузке.

Для выявления причин колебаний значений крутящего момента на заводе АО «Тулаэлектропривод» проводились экспериментальные измерения крутящего момента при испытании электроприводов (рис. 6). Колебания значений крутящего момента находились в пределах $\pm$ 32 % от номинального крутящего момента.

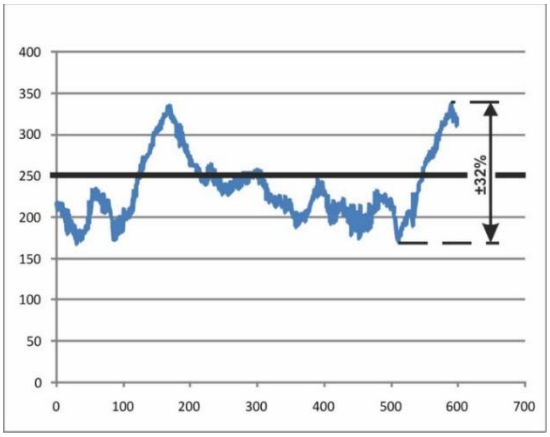


Рис. 6. Измерения крутящего момента стенда «М» АО «Тулаэлектропривод» (по вертикали – крутящий момент, Н·м; по горизонтали – номер проводимого измерения)

Рассмотренные стенды имеют схожие функции и технические характеристики, но во всех случаях тормозной момент создается за счет механического тормоза, что приводит к значительному разбросу его значений. С учетом полученной при испытаниях информации для устранения недостатков стендов на заводе АО «Тулаэлектропривод» было принято решение разработать новую линейку испытательных стендов, с использованием для создания тормозных моментов пневмо- или гидроприводa, что позволит стабилизировать значение тормозного момента.

Список литературы

1. Гуревич Д.Ф., Заринский О.Н., Косых А.И. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением: справочник / под общ. ред. С.И. Косых. Л.: Машиностроение, 1982. 320 с.

2. ГОСТ 24956-2014. Арматура трубопроводная, Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2015. 73 с.

3. Электропривод трубопроводной арматуры / М.В. Грязев [и др.] / под ред. В.Я. Распопова. М.: Машиностроение, 2012. 386 с.

4. Многооборотный электропривод трубопроводной арматуры / М.В. Грязев [и др.]; под ред. В.Я. Распопова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 322 с.

5. Башарин А.В. Управление электроприводами / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. Л.: Энергоиздат, 1982. 392 с.

6. ГОСТ 15.309-98. Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции. Основные положения. Минск: Издательство стандартов, 2008. 13 с.

7. Мозжечков В.А. Общие тенденции развития электроприводов трубопроводной арматуры // Арматуростроение. 2009. № 6 (63). С. 34 – 40.

8. Мозжечков В.А., Борисов В.К., Савин А.С. Электроприводы трубопроводной арматуры серии ЭП4 // Известия Тульской государственный университет. Технические науки. 2011. Вып. 5. С. 21 – 32.

9. Мозжечков В.А. Третье поколение тульских электроприводов для атомных станций – серия ЭП4 // Арматуростроение. 2010. № 2 (65). С. 82 – 85.

10. Мозжечков В.А., Савин А.С. Анализ динамики функционирования электроприводов трубопроводной арматуры // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 1. С. 133 – 142.

11. Алалуев Р.В., Малютин Д.М., Плясов А.В. [и др.]. Испытания многооборотного электропривода для управления, регулирования и мониторинга запорной арматуры магистралей трубопроводного транспорта // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып 12. С. 77 – 88.

12. Usinin Y.S., Dudkin M.M., Shishkov A.N. Differential electric drive in the machine industry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012034.

13. Прогрессивные решения ProSolution. Тестирующее оборудование [Электронный ресурс] URL: https://aumprivod.pro-solution.ru/#catalog (дата обращения 02.10.2023).

14. ПКБА. Пензенское конструкторско-технологическое бюро арматуростроения. Стенд для испытания электроприводов [Электронный ресурс] URL: https://pktba.ru/catalog/product/pktba-si-ep--1 (дата обращения 02.10.2023).

15. АО «ТОМЗЭЛ». Каталог продукции [Электронный ресурс] URL: https://tomzel.transneft.ru/proc/katalog-prodykcii (дата обращения 02.10.2023).

16. Тулаэлектропривод. Проектирование, производство, поставка электроприводов для трубопроводной арматуры [Электронный ресурс] URL: https://tulaprivod.ru (дата обращения 02.10.2023).

Крюков Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, va.krukov@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Тюменев Дмитрий Александрович, аспирант, tyumenev.d@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ANALYSIS OF TEST BENCHES FOR ELECTRIC DRIVES OF PIPELINE FITTINGS

V.A. Krukov, D.A. Tyumenev

The article describes the purpose and functions of the pipeline armature, drives and test benches for electric drives of pipe-wire reinforcement. The test benches of various manufacturers are considered. The advantages and disadvantages of the stands are revealed. The directions of improvement of test benches are defined.

Key words: pipeline fittings, electric drive, test bench, torque.

Krukov Vladimir Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, va.krukov@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Tyumenev Dmitry Alexandrovich, postgraduate, tyumenev.d@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.9.06
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-573-574

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПРИВОДА

В.А. Крюков, А.В. Плясов

Приведена математическая модель для обобщенной схемы многодвигательного дифференциального привода автоматических роторных линий. Получено решение задачи кинематического анализа в общем виде. В качестве примера выполнен кинематический анализ двухдвигательного дифференциального привода. Проанализировано влияние параметров передач и замкнутого контура в приводе на его кинематику.

Ключевые слова: автоматические роторные линии, многодвигательный дифференциальный привод, планетарные передачи, кинематика, кинематический анализ.

Введение. Многие технологические машины создаются по классической схеме: источник механического движения (двигатель) – передаточный механизм – рабочая машина. Стремление к выполнению нескольких технологических операций в пределах одного машинного агрегата привело к включению в его состав нескольких рабочих машин. Характерным примером такого машинного агрегата служит автоматическая роторная линия. Увеличение числа рабочих машин при одновременном увеличении рабочих и транспортных скоростей, связанном с увеличением производительности, вызывает резкий рост потребляемой мощности. Одним из перспективных направлений совершенствования машин в этих условиях является переход на более сложные функциональные схемы машинных агрегатов, включающих в свой состав несколько рабочих машин и несколько двигателей. Это, в свою очередь, приводит к необходимости совершенствования передаточных механизмов и переходу к многопоточной передаче энергии от источников к потребителям. Необходимо отметить, что такой подход на современном этапе характерен не только для автоматических роторных линий, но и ряда других отраслевых машин [1-10].

Выполняемые технологические операции требуют синхронизации движения рабочих машин, для чего, во многих случаях, используется кинематическая связь между главными валами рабочих машин. А это приводит к появлению избыточных связей, ухудшению динамики, росту дополнительных динамических нагрузок, снижению КПД, неравномерной нагрузке на двигатели. Широко распространенным методом устранения этого недостатка является использование систем автоматического управления работой двигателей [11-16].

Более традиционный подход, не требующий использования дорогостоящих электронных компонентов, заключается в устранении избыточных связей за счет уменьшения общего числа связей [17-22]. Это обеспечивается с помощью использования в приводе механизмов с несколькими степенями свободы. В опытном образце автоматической роторной линии высокой производительности был использован многодвигательный дифференциальный привод [5-6]. Этот привод позволяет использовать несколько равномерно нагруженных двигателей, обеспечить передачу энергии от источников к потребителям короткими кинематическими цепями, получить несколько скоростных режимов работы. Испытания линии подтвердили удовлетворительную работу привода в основном рабочем режиме. Но в наладочных режимах, при включении части двигателей, динамика привода ухудшалась. Причиной этого является наличие замкнутых контуров и появление циркулирующей мощности. А это требует при проектировании привода проведения тщательного исследования динамических процессов в системе. Первым подготовительным этапом для исследования динамики является решение задач кинематического анализа и синтеза, которые для рассматриваемого привода имеют ряд существенных особенностей. Целью данной работы является разработка математической модели, описывающей кинематику обобщенной схемы многодвигательного дифференциального привода, и решение задачи кинематического анализа.

Математическая модель двухступенчатого дифференциального редуктора с тремя степенями свободы. Основой многодвигательного дифференциального привода являются двухступенчатые дифференциальные редукторы с тремя степенями свободы. В приводе используются редукторы двух типов, отличающиеся расположением звеньев, используемых для соединения редукторов в приводе (рис. 1).

На схемах латинскими буквами обозначены звенья и/или соответствующие зубчатые колеса (первой и второй ступени):

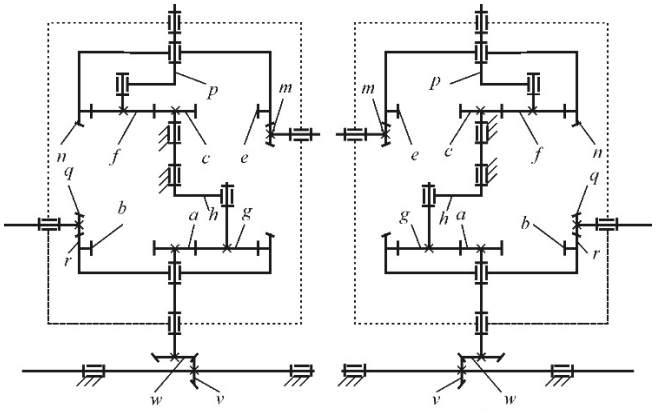
a, c – центральные зубчатые колеса с внешними зубьями (солнечные шестерни);

b, e – центральные зубчатые колеса с внутренними зубьями (эпициклы);

g, f – сателлиты;

h, p – водила;

q, r, m, n – конические зубчатые колеса вспомогательных передач, используемых для соединения редукторов в приводе.



а *б*

Рис. 1. Кинематические схемы дифференциального редуктора: а – тип 1; б – тип 2

Механизм имеет три степени свободы: входы – $a,\ q, m$; выход – p.

Коническая передача v, w необходима для передачи движения с горизонтального вала электродвигателя на вертикальный вал дифференциального редуктора, изменения угловой скорости на его входе и характеризуется передаточным отношением $i_{wv} = \omega_w / \omega_v$. В дальнейшем эта передача при составлении математической модели учитывается с помощью задания угловой скорости на входе a редуктора,

$$\omega_a = i_{wv} \cdot \omega_{\text{дв}},$$

где $\omega_{\text{дв}}$ – угловая скорость вала электродвигателя.

Кинематика дифференциальных передач, входящих в состав редуктора, описывается известными зависимостями:

$$\begin{gathered} \omega_h = i_{ha}^{(b)} \omega_a + i_{hb}^{(a)} \omega_b; \\ \omega_p = i_{pc}^{(e)} \omega_c + i_{pe}^{(c)} \omega_e; \\ \omega_c = \omega_h, \end{gathered} \tag{1}$$

где передаточные отношения: $i_{ha}^{(b)} = \dfrac{z_a}{z_a + z_b}$; $i_{hb}^{(a)} = \dfrac{z_b}{z_a + z_b}$; $i_{pc}^{(e)} = \dfrac{z_c}{z_e + z_c}$; $i_{pe}^{(c)} = \dfrac{z_e}{z_e + z_c}$.

Объединяя уравнения (1), получим

$$\omega_p = i_{pa} \omega_a + i_{pb} \omega_b + i_{pe} \omega_e, \tag{2}$$

где $i_{pa} = i_{pc} \cdot i_{ha}$; $i_{pb} = i_{pc} \cdot i_{hb}$.

Здесь и ниже для упрощения записи верхние индексы опускаем.

Несколько сложнее обстоит дело с представлением кинематических зависимостей для конических передач $q - r, m - n$. Традиционно, знак передаточного отношения вводится только для передач с параллельными осями. Для передач с пересекающимися осями этот знак не имеет смысла. Для многозвенных зубчатых передач последовательный анализ направлений вращения трудоемок, а для рассматриваемой передачи в общем случае может быть и невозможным. Поэтому введем следующие определения: «Угловую скорость звена с горизонтальной осью вращения будем считать положительной, если при взгляде слева направление вращения будет видно происходящим против часовой стрелки»; «Угловую скорость звена с вертикальной осью вращения будем считать положительной, если при взгляде сверху направление вращения будет видно происходящим против часовой стрелки».

С учетом этих определений кинематика рассматриваемых конических передач в механизмах обоих типов будет описываться одинаковыми уравнениями:

$$\omega_r = i_{rq} \cdot \omega_q; \quad \omega_n = i_{nm} \cdot \omega_m,$$

но сами передаточные отношения будут различными:

для дифференциального редуктора типа 1:

$$i_{rq} = +z_q / z_r;\ i_{nm} = +z_m / z_n;$$

для дифференциального редуктора типа 2:

$$i_{rq} = -z_q / z_r;\ i_{nm} = -z_m / z_n.$$

Окончательно, математическую модель дифференциального редуктора запишем в виде

$$\omega_p = i_{pa} \cdot \omega_a + i_{pq} \cdot \omega_q + i_{pm} \cdot \omega_m,$$

где $i_{pq} = i_{pb} \cdot i_{rq}$; $i_{pm} = i_{pe} \cdot i_{nm}$.

Математическая модель обобщенной схемы многодвигательного дифференциального привода. Обобщенная схема механизма привода с N двухступенчатыми дифференциальными редукторами и N двигателями приведена на рис. 2.

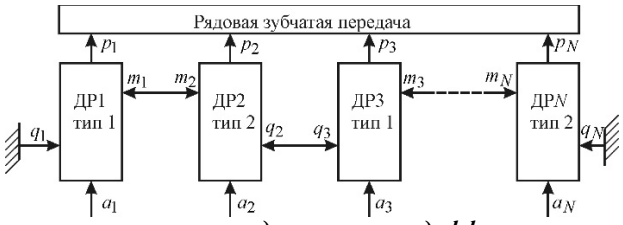


Рис. 2. Структурная схема многодвигательного дифференциального привода

Основные входы дифференциальных редукторов $a_i, i = 1,2,...,N$ соединены с двигателями непосредственно или через вспомогательные конические передачи. Дополнительные входы $m_i, i = 1,2,...,N$; $q_i, i = 2,3,...,N-1$ соседних редукторов соединены между собой и образуют вспомогательные кинематические цепи, предназначенные для передачи части мощности при разной полезной нагрузке на роторах или разных двигателях, а также в наладочных режимах при включении части двигателей. Дополнительные входы q_1, q_N соединены со стойкой и используются для установки предохранительных устройств. Выходы дифференциальных редукторов $p_i, i = 1,2,...,N$ соединены рядовой зубчатой передачей, осуществляющей кинематическую синхронизацию их вращения. В общем случае эта кинематическая цепь может включать в свой состав паразитные зубчатые колеса и, следовательно, реализовать соотношения $\operatorname{sgn}(\omega_{p_i} \cdot \omega_{p_{i+1}}) = +1$ или $\operatorname{sgn}(\omega_{p_i} \cdot \omega_{p_{i+1}}) = -1$.

При решении задачи кинематического анализа заданными считаются угловые скорости на основных входах редукторов $\omega_{a_i}, i = 1,2,...,N$ и числа зубьев зубчатых колес планетарных передач. Определяются: угловые скорости на выходах редукторов ω_{p_i}, $i = 1,2,...,N$ и угловые скорости звеньев вспомогательных кинематических цепей ω_{q_i}, ω_{m_i}, $i = 1,2,...,N$.

Математическая модель системы будет состоять из:

уравнений, описывающих кинематику дифференциальных редукторов,

$$\omega_{p_i} - i_{p_i q_i}\omega_{q_i} - i_{p_i m_i}\omega_{m_i} = i_{p_i a_i}\omega_{a_i}, \quad i = 1,2,...N; \tag{3}$$

уравнений, описывающих дополнительные связи между редукторами,

$$\begin{cases} \omega_{q_1}=0; \\ \omega_{m_{i+1}} - \omega_{m_i} = 0, \quad i = 1,3,5....,N-1; \\ \omega_{q_{i+1}} - \omega_{q_i} = 0, \quad i = 2,4,6....,N-2; \\ \omega_{q_N} = 0; \end{cases} \tag{4}$$

уравнений рядовой зубчатой передачи

$$i_{p_{i+1}p_i}\omega_{p_i} - \omega_{p_{i+1}} = 0, \quad i = 1,2,...N-1, \tag{5}$$

где $i_{p_{i+1}p_i} = \pm z_{\text{рп}_i} / z_{\text{рп}_{i+1}}$; $z_{\text{рп}_i}$ – числа зубьев зубчатых колес рядовой зубчатой передачи. Знак передаточного отношения зависит от наличия или отсутствия паразитных зубчатых колес.

Систему $3N$ алгебраических уравнений (3), (4), (5) запишем в матричной форме

$$\boldsymbol{A\Omega} = \boldsymbol{B}, \tag{6}$$

где $\boldsymbol{\Omega}$ – матрица-столбец неизвестных, размер $3N \times 1$,

$$\boldsymbol{\Omega}^T = \left\| \omega_{p_1} \quad \omega_{p_2} \quad ... \quad \omega_{p_N} \quad \omega_{q_1} \quad \omega_{q_2} \quad ... \quad \omega_{q_N} \quad \omega_{m_1} \quad \omega_{m_2} \quad ... \quad \omega_{m_N} \right\|;$$

$\boldsymbol{B}$ – матрица-столбец правых частей размера $3N \times 1$,

$$\boldsymbol{B}^T = \left\| i_{p_1 a_1}\omega_{a_1} \quad ... \quad i_{p_N a_N}\omega_{a_N} \quad 0 \quad ... \quad 0 \right\|.$$

Матрицу системы $\boldsymbol{A}$ размера $3N \times 3N$ представим в блочной форме,

$$\boldsymbol{A} = \left\| \begin{array}{c|c|c} \boldsymbol{E} & \boldsymbol{A}_{12} & \boldsymbol{A}_{13} \\ \hline \boldsymbol{A}_{21} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \hline \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A}_{32} & \boldsymbol{A}_{33} \end{array} \right\|,$$

где $\boldsymbol{E}$ – единичная матрица размера $N \times N$; $\boldsymbol{0}$ – нулевые матрицы размеров $N-1\times N,\ N-1\times N,\ N+1\times N$ соответственно;

$$\boldsymbol{A}_{12}=\begin{Vmatrix} -i_{p_1q_1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -i_{p_2q_2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -i_{p_3q_3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -i_{p_Nq_N} \end{Vmatrix};\quad \boldsymbol{A}_{13}=\begin{Vmatrix} -i_{p_1m_1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -i_{p_2m_2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -i_{p_3m_3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -i_{p_Nm_N} \end{Vmatrix};$$

$$\boldsymbol{A}_{21}=\begin{Vmatrix} i_{p_2p_1} & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & i_{p_3p_2} & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & i_{p_4p_3} & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & i_{p_Np_{N-1}} & -1 \end{Vmatrix};\quad \boldsymbol{A}_{32}=\begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{Vmatrix};$$

$$\boldsymbol{A}_{33}=\begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{Vmatrix}.$$

Общее решение уравнения (6) для обобщенной схемы при произвольном числе редукторов

$$\boldsymbol{\Omega}=\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}. \tag{7}$$

Современное программное обеспечение на основе решения (7) легко позволяет выполнить кинематический анализ для конкретной схемы привода.

Кинематический анализ двухдвигательного дифференциального привода. В качестве примера рассмотрим решение задачи кинематического анализа для двухдвигательного привода. Схема привода приведена на рис. 3. Для упрощения результатов анализа будем считать, что в приводе использованы одинаковые редукторы. Варьировать будем угловые скорости на входе и передаточное отношение рядовой зубчатой передачи. Так как кинематические уравнения рассматриваемой системы линейны относительно угловых скоростей, то угловые скорости на входе будем варьировать в пределах от -2000 рад/с до +2000 рад/с.

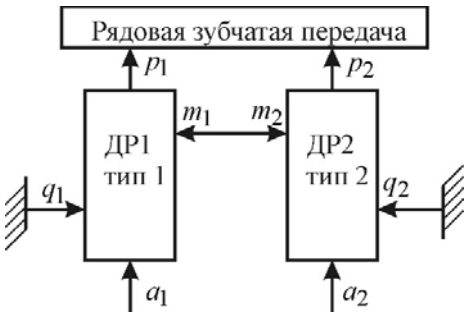


Рис. 3. Структурная схема двухдвигательного дифференциального привода

Числа зубьев зубчатых колес редукторов:

$$z_{a_1}=z_{a_2}=21;\ z_{b_1}=z_{b_2}=63;\ z_{g_1}=z_{g_2}=21;$$
$$z_{f_1}=z_{f_2}=21;\ z_{e_1}=z_{e_2}=63;\ z_{f_1}=z_{f_2}=21;$$
$$z_{q_1}=z_{q_2}=20;\ z_{r_1}=z_{r_2}=80;$$
$$z_{m_1}=z_{m_2}=20;\ z_{n_1}=z_{n_2}=80.$$

Передаточные отношения:

$$i_{p_1a_1}=i_{p_2a_2}=0{,}0625;\ i_{p_1e_1}=i_{p_2e_2}=0{,}75;$$
$$i_{p_1m_1}=-0{,}188;\ i_{p_2m_2}=0{,}188;\quad i_{p_1q_1}=-0{,}0156;\ i_{p_2q_2}=0{,}0156.$$

Математическая модель будет представлять собой систему шести линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \omega_{p_1} - i_{p_1 q_1}\omega_{q_1} - i_{p_1 m_1}\omega_{m_1} = i_{p_1 a_1}\omega_{a_1}; \\ \omega_{p_2} - i_{p_2 q_2}\omega_{q_2} - i_{p_2 m_2}\omega_{p_2} = i_{p_2 a_2}\omega_{a_2}; \\ \omega_{q_1} = 0; \\ \omega_{m_1} - \omega_{m_2} = 0; \\ \omega_{q_2} = 0; \\ i_{p_2 p_1}\omega_{p_1} - \omega_{p_2} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Для исследования свойств привода рассмотрим несколько вариантов. Исходные данные и результаты расчетов приведены в таблице.

Вариант 1. Угловые скорости на входах a одинаковы; передаточное отношение рядовой зубчатой передачи $i_{p_2 p_1} = +1$. Реактивная связь неподвижна; энергия от источников к потребителям передается прямыми кинематическими цепями.

Вариант 2. Угловые скорости на входах a различны; передаточное отношение рядовой зубчатой передачи $i_{p_2 p_1} = +1$. Реактивная связь вращается с угловой скоростью соизмеримой с угловой скоростью на выходах редукторов; часть энергии от источников к потребителям передается через реактивную связь.

Вариант 3. Угловые скорости на входах a одинаковы по модулю, но двигатели включены встречно; передаточное отношение рядовой зубчатой передачи $i_{p_2 p_1} = +1$. Выходные звенья редукторов неподвижны; реактивная связь вращается; вся энергия циркулирует в замкнутом контуре $p_1 \to$ рядовая зубчатая передача $\to p_2 \to$ ДР2 $\to m_2 \to m_1 \to$ ДР1 $\to p_1$.

Вариант 4. Угловые скорости на входах a одинаковы; передаточное отношение рядовой зубчатой передачи $i_{p_2 p_1} = -1$. Решение системы уравнений (8) отсутствует. Физически это соответствует возникновению самоторможения в приводе.

Результаты математического моделирования двухдвигательного дифференциального привода

Вариант	Исходные данные			Результаты расчета		
	ω_{a_1}, рад/с	ω_{a_2}, рад/с	$i_{p_2 p_1}$	$\omega_{m_1} = \omega_{m_2}$, рад/с	ω_{p_1}, рад/с	ω_{p_2}, рад/с
1	1000	1000	1	0	63	63
2	1000	2000	1	-168	94,5	94,5
3	1000	-1000	1	336	0	0
4	1000	1000	-1	Решение отсутствует		

Для более подробного анализа последнего варианта построим график зависимости определителя системы

$$D = \det \begin{Vmatrix} 1 & 0 & -i_{p_1 q_1} & 0 & -i_{p_1 m_1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -i_{p_2 q_2} & 0 & -i_{p_2 m_2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ i_{p_2 p_1} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}$$

от передаточного отношения $i_{p_2 p_1}$ (рис. 4).

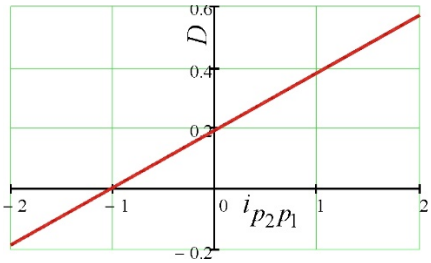


Рис. 4. Анализ определителя системы

При $i_{p_2 p_1} = -1$ определитель системы равен нулю, ранг матрицы системы равен 5, ранг расширенной матрицы равен 6, следовательно, система уравнений (8) несовместна.

Заключение. Полученная математическая модель многодвигательного дифференциального привода позволяет выполнять кинематический анализ привода при любых значениях параметров схемы.

Список литературы

1. Kulikov A., Kaverin V., Zyuzev A. Analyzing the Main Belt Conveyor Dual-motor Asynchronous Electric Drive Operating Modes // Труды университета. 2022. № 3 (88). P. 327-333.

2. Данилов П.Е., Барышников В.А., Рожков В.В. Теория электропривода. М.-Берлин, 2018. 416 с.

3. Крюков В.А., Прейс В.В. Система приводов технологических роторных машин пищевой промышленности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-1. С. 100-111.

4. Крюков В.А., Прейс В.В. Системы приводов рабочих движений автоматических роторных и роторно-конвейерных линий // Вестник машиностроения. 2003. № 1. С. 36-41.

5. Крюков В.А., Прейс В.В. История и перспективы развития приводов транспортного движения автоматических роторных линий / Вибрационные машины и технологии. Сборник научных трудов по материалам VI научно-технической конференции / отв. ред. С.Ф. Яцун. 2003. С. 31-33.

6. Крюков В.А., Прейс В.В. Системы приводов транспортного движения автоматических роторных и роторно-конвейерных линий // Вестник машиностроения. 2003. № 2. С. 33-38.

7. Крюков В.А., Корнюхин И.Ф. Приводы автоматических роторных и роторно-конвейерных линий // СТИН. 2000. № 11. С. 6-10.

8. А.с. 877159 СССР. Многодвигательный привод / Петров Ю.А. Опубл. 07.08.1992. Бюл. № 29.

9. А.с. 618420. Многодвигательный привод конвертера / Крайзингер Ф.В., Зинский А.И., Еременко.С.С. и др. Опубл. 05.08.1978. Бюл. № 29.

10. А.с. 568457. Многодвигательный привод преимущественно для барабанов мощных мельниц / Слепян В.И., Слизкий П.И. Опубл. 15.08.1977. Бюл. № 30.

11. Патент на изобретение RU 2583841 C1. Многодвигательный электромеханический привод и способ его работы / Урсу В.Е., Урсу В.В. Опубл. 10.05.2026.

12. Сальников ВС., Шадский Г.В. Многодвигательный привод технологических машин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 3. С. 7-15.

13. Патент на изобретение RU 2656999 C1. Многодвигательный привод поворотной платформы / Каржавов Б.Н., Беспалов В.Я., Сидоров А.О. Опубл. 08.06.2018. Бюл. № 16.

14. Егоров В.Ф., Егоров С.В. Динамические режимы многодвигательных электромеханических систем // Омский научный вестник. 2010. № 1 (87). С. 80-84.

15. А.с. 396802. Многодвигательный привод / Кучумов В.А. Опубл. 29.08.1973. Бюл. № 36.

16. А.с. 93832. Многодвигательный привод / Салитринник Б.А., Пивоваров А.А. Опубл. 1964. Бюл. № 16.

17. Решетов Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы: Справочник. М.: Машиностроение. 1991. 288 с.

18. Гудимова Л.Н., Дворников Л.Т. Проблемы исключения избыточных связей в плоских шарнирных механизмах // Фундаментальные исследования. 2013. № 6 (часть 1). С. 24-32.

19. Дворников Л.Т., Гудимова Л.Н., Большаков Н.С. Опыт исключения избыточных связей в шестизвенных плоских механизмах // Изв. ВУЗов. Машиностроение. 2007. № 5. С. 29-38.

20. Сидоров П.Г., Крюков В.А., Плясов А.В. Новое поколение многопоточных рычажно-зубчатых передач в высокоэнерговооруженных приводах машин воздушного, водного, наземного и подземного базирования / Теория и практика зубчатых передач. Сборник трудов Международного симпозиума / научный редактор В. И. Гольдфарб. 2014. С. 468-477.

21. Сидоров П.Г., Распопов В.Я., Крюков В.А. Инновационные разработки Тульского государственного университета в области современной приводной техники // Проблемы механики современных машин. Материалы V международной конференции. 2012. С. 140-144.

22. Тимофеев Г.А., Мусатов А.К., Попов С.А. [и др.]. Теория механизмов и механика машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2022. 558 с.

Крюков Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, va.krukov@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Плясов Алексей Валентинович, канд. техн. наук, доцент, plyasov-a@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

KINEMATIC ANALYSIS OF MULTI-MOTOR DIFFERENTIAL DRIVE

V.A. Krukov, A.V. Plyasov

A mathematical model for a generalized scheme of a multi-motor differential drive of automatic rotary lines is presented. The solution of the kinematic analysis problem in a general form is obtained. As an example, a kinematic analysis of a two-motor differential drive is performed. The influence of the transmission parameters and the closed loop in the drive on its kinematics is analyzed.

Key words: automatic rotary lines, multi-motor differential drive, planetary gears, kinematics, kinematic analysis.

Krukov Vladimir Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, va.krukov@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Plyasov Alexey Valentinovich, candidate of technical sciences, docent, plyasova@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 62-97-82
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-579-580

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

С.С. Бусаров, А.В. Недовенчаный, К.А. Бакулин, Н.Г. Синицин

Как показали исследования поршневые компрессоры занимают последнее место среди объёмных машин по производительности. В работе рассмотрена возможность повышения производительности поршневых машин для обеспечения реальной конкуренции по данному параметру с другими типами машин. За основные результаты были взяты достижения, связанные с тихоходными поршневыми машинами, что позволило показать потенциальную возможность повышения коэффициента подачи поршневых компрессоров до 0,9…0,93.

Ключевые слова: поршневой компрессор, тихоходная машина, коэффициент подачи.

Производительность является одним из главных параметров любого компрессора не зависимо от принципа действия. При этом удобно использовать относительный показатель для возможности сравнения любых компрессоров с небольшой производительности до значений производительности 1 м3/с и выше. Таким относительным параметром является коэффициент подачи. Значение данного параметра – доля производительности действительной машины по сравнению с идеальной идентичной машиной. Он включает в себя ряд факторов, которые в реальном компрессоре уменьшают производительность, данные факторы будут рассмотрены ниже.

Для различных конструкций коэффициент подачи имеет различные значения так для интересующих нас поршневых машин значения составляют 0,7 – 0,85; в спиральных компрессорах достигает значения 0,95 (отсутствие мёртвого объёма и клапанов, а также большая частота вращения вала); в винтовых компрессорах -0,95; динамические компрессора – 0,95…0,98.

Из представленных данных видно, что коэффициент подачи у поршневых компрессоров имеет наименьшее значение по сравнению с другими типами компрессоров. Это обусловлено конструктивными особенностями, а именно наличие клапанов и мёртвого объёма значительно снижают производительность, к тому же, ещё и подогрев газа на всасывании. В остальных же типах компрессоров снижение производительности связано с утечками газа, однако с этим фактором успешно борются, применяя быстроходные приводы, что приводит к столь впечатляющим результатам - коэффициент подачи более 0,9.

Таким образом, актуальной задачей совершенствования поршневых компрессоров является повышение коэффициента подачи до значений характерных для наиболее прогрессивных типов компрессоров обладающих наилучшими значениями по данному параметру.

Как известно из теории на коэффициент подачи поршневых компрессоров влияют основные 5 факторов: наличие мёртвого объёма, дроссельные потери во всасывающих клапанах, подогрев газа на всасывании, утечки и наличие влаги во всасываемом газе.

Можно отметить, что наличие влаги как фактор не будет рассмотрен в данной работе в виду небольшого влияния и возможности устранения данного фактора при осушке всасываемого газа.

Рассмотрим первый из факторов – влияние мёртвого объёма.

Известны решения, в которых для уменьшения линейного и кольцевого мёртвого пространства применяются поршневые кольца Г – образного сечения и эластомерный диск на торцевой поверхности цилиндра (см. рисунок 1). Статистические данные показывают, что линейный мертвый объём составляет до 75%, кольцевой до 20%, а мёртвый объём в проточках клапанов до 5% от общего мёртвого объёма [1-4]. Соответственно если принять относительный мертвый объём равный am=0,1, то применение перспективных конструктивных решений позволит снизить его до – значения:

$$am' = 0{,}05*0{,}1=0{,}005 \quad (1)$$

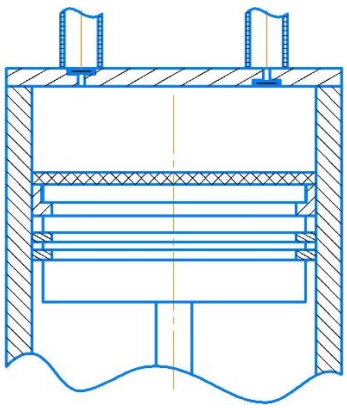


Рис.1. Конструкция рабочей камеры поршневого компрессора с отсутствующим линейным и кольцевым мертвым объёмом

При этом приняв показатель политропы равный 1,08 [5,6], характерный для тихоходных поршневых машин [7] при значениях отношения давлений в ступени 3 … 5 и используя известную зависимость

$$\lambda_0 = 1 - a_m\left(\left(\frac{P_н}{P_{вс}}\right)^{1/m} - 1\right), \quad (2)$$

получаем значение λ_0=0,98…0,99.

Известны также тихоходные квазиизотермические ступени с интенсивным внешним охлаждением, в которых коэффициент подогрева ($\lambda_т$) составляет 0,98 [8]. В существующих быстроходных ступенях коэффициент подогрева составляет приблизительно 0,96 [2].

Дроссельные потери ($\lambda_{др}$) в тихоходных машинах составляют до 0,98 [8] при этом в существующих быстроходных машинах достигает значения 0,96[2].

Соответственно коэффициент учитывающий герметичность рабочей камеры ($\lambda_{пл}$) находится в пределах 0,96 для быстроходных машин, а для тихоходных значительно зависит от отношения давлений в ступени и изменяется от 0,8 до 0,6 при средних давлениях, для отношения давлений в ступени равное 5 можно принять его 0,96.

Тогда прогнозный коэффициент подачи для поршневых машин может составить:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \lambda_Т \cdot \lambda_{др} \cdot \lambda_{пл} \quad (3)$$

тогда

$$\lambda = 0{,}98 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}96 = 0{,}9$$

Таким образом внедрив достижения тихоходных машин можно для “привычных” степеней повышения давления достигнуть коэффициента подачи 0,9…0,93.

Список литературы

1.Объёмные компрессоры: Атлас конструкций / Г. А. Поспелов, П. И. Пластинин, А. И. Шварц [и др.] ; под общ.ред. Г. А. Поспелова. М.: Машиностроение, 1994. 120 с.

2.Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Москва: Колос, 2000. Т. 1. 456 с.

3.Френкель М.И. Поршневые компрессоры: теория, конструкции и основы проектирования. 3-е издание, переработанное и дополненное. Издательство Л.: Машиностроение, 1969. 744 с.

4.Поршневые компрессоры / Б.С. Фотин, И.Б. Пирумов, И. К. Прилуцкий, П.И. Пластинин; Под общ. ред. Б.С. Фотина. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 372 с.

5.Юша В.Л., Бусаров С.С. Экспериментальная оценка индикаторного коэффициента подачи поршневой длинноходовой компрессорной ступени // Компрессорная техника и пневматика. 2020. № 3. С. 39–41.

6.Юша В.Л., Бусаров С.С. Определение показателей политропы схематизированных рабочих процессов воздушных поршневых тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 1. С. 15–22. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-15-22.

7.Юша В.Л., Бусаров С.С. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней / Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 80–89. DOI: 10.18721/JEST.24408.

8.Бусаров С.С., Юша В.Л. Методика расчёта действительной производительности одноступенчатых длинноходовых поршневых компрессоров // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, №4. С. 9-15.

Бусаров Сергей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, bssi1980@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Недовенчаный Алексей Васильевич, канд. техн. наук, старший преподаватель, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Бакулин Константин Александрович, бакалавр, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Синицин Никита Глебович, магистрант, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

PROSPECTS FOR IMPROVING THE PERFORMANCE OF RECIPROCATING COMPRESSORS

S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanny, K.A. Bakulin, N.G. Sinitsin

Research has shown that reciprocating compressors occupy the last place among volumetric machines in terms of performance. The paper considers the possibility of increasing the productivity of reciprocating machines to ensure real competition in this parameter with other types of machines. The main results were based on achievements related to low-speed reciprocating machines, which allowed us to demonstrate the potential possibility of increasing the feed rate of reciprocating compressors to 0.9...0.93.

Key words: reciprocating compressor, low-speed machine, feed ratio.

Busarov Sergey Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, bssi1980@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Nedovenchany Alexey Vasilyevich, candidate of technical sciences, senior lecturer, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Bakulin Konstantin Alexandrovich, bachelor's degree, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Nikita Glebovich Sinitsin, undergraduate, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 621.8
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-581-582

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШЕСТИЗВЕННОГО МЕХАНИЗМА НА ОСНОВЕ ДВУХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ ИМЕЮЩИЕ СТРУКТУРА ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА

М.Р. Фаизов, Ф.Ф. Хабибуллин, И.А. Романов

Шестизвенный механизм получаемый из двух механизмов Беннетта реализуется исследованием на основании подведения всех параметров к его стойке. В основе механизм устанавливаются стандартные соотношения Беннетта. Путем стандартов соотношений задается условия возможности реализации звена стойки. Определяется его длина, угол наклона пространственного расположения относительно друг друга шарниров. Высота геометрических высот правого и левого шарнира. Угол наклона самих высот правого и левого шарнира. Все параметры подбираются для виртуального шарнира являющимся показателем вращения полного оборота через себя всего шестизвенного механизма.

Ключевые слова: Беннетт, параллелепипед, шестизвенный механизм, геометрия построения.

Условие исследования. Берутся два механизмам Беннетта ABCK и LDEF. Данные механизмы объединяются, как представлено на рисунке 1. Получаем новый пространственный механизм ABCDEF [1-2]. На данной схеме представлены все геометрические параметры механизма, со всеми обозначениями.

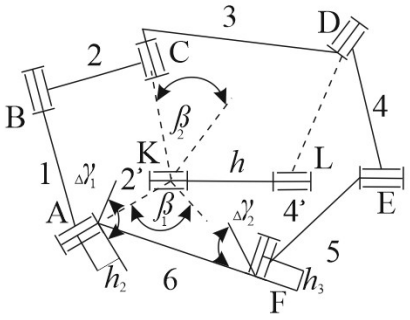


Рис. 1. Схема шестизвенного механизма

Параметры механизма из шести звеньев, исходя из структуры механизма Беннетта, будут связана определенными соотношениями:

$$\frac{l_1}{\sin\alpha_1}=\frac{l_2}{\sin\alpha_2} \tag{1}$$

$$\frac{l_4}{\sin\alpha_4}=\frac{l_5}{\sin\alpha_5} \tag{2}$$

Параметры комбинированного звена 6

$$\alpha_6=\arccos(\cos\alpha_2\cos\alpha_4+\sin\alpha_2\sin\alpha_4\cos\beta) \tag{3}$$

$$A=(\sin\alpha_2\cos\alpha_4+\cos\alpha_2\sin\alpha_4\cos\beta)^2+\sin^2\alpha_4\sin^2\beta$$

$$l_6=-\frac{\sin\alpha_6}{A}\left[l_2(\sin\alpha_4\cos\alpha_2\cos\beta-\sin\alpha_2\cos\alpha_4\right]+l_4(\sin\alpha_2\cos\alpha_4\cos\beta-\sin\alpha_4\cos\alpha_2)-h_2(\sin\alpha_2\sin\alpha_4\cos\alpha_2\sin\beta) \tag{4}$$

$$h_2=\frac{1}{A}h\sin\alpha_4((\sin\alpha_2\cos\alpha_4\cos\beta-\sin\alpha_4\cos\alpha_2)+(l_4\sin\alpha_2-l_2\sin\alpha_4\cos\alpha_6)\sin\beta \tag{5}$$

$$h_3=\frac{1}{A}h\sin\alpha_2((\sin\alpha_4\cos\alpha_2\cos\beta-\sin\alpha_2\cos\alpha_4)+(l_2\sin\alpha_4-l_4\sin\alpha_2\cos\alpha_6)\sin\beta \tag{6}$$

h - данное пространственное расстояние призрачных шарниров, расположенных в пространстве механизма.

$$\Delta_{\gamma_1}=\arccos(\frac{1}{\sin\alpha_6}\sin\alpha_2\cos\alpha_4-\cos\alpha_2\sin\alpha_4\cos\beta) \tag{7}$$

$$\Delta_{\gamma_2}=\arccos(\frac{1}{\sin\alpha_6}\sin\alpha_4\cos\alpha_2-\cos\alpha_4\sin\alpha_2\cos\beta) \tag{8}$$

В данном случаи заданы определенные параметры звеньев. Известны расстояния и определенные углы четырех звеньев [3-5]. Для сбалансированного вращения задано соотношение расположенных звеньев рядом определяющих зависимость движения в пространстве [6-8]. Существует пространственное призрачное звено с выстой и двумя углами вращения [9-12]. Известно угол и длина расчета звена используемого в роли стойки. Известны параметры наклонов и высот его шарниров [13-15].

Аналитическое исследование формул для реализации механизма. На рисунке 2 представлен результат соотношения изменение пространственного угла станины 6.

По результату исследования видно, что при полном обороте виртуального угла Бетта, требуемое значение угла звена будет иметь в точке максимума равной 80 градусам [16-18].

Само исследование размера длины звена стойки 6 представляется на рисунке 3, по-прежнему учитываем полный оборот вращения виртуального шарнира под углом Бетта, который совершает оборот в 360 градусов [19-20].

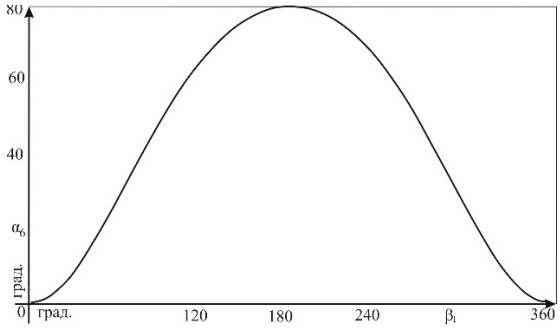


Рис. 2. Угловой диапазон звена 6

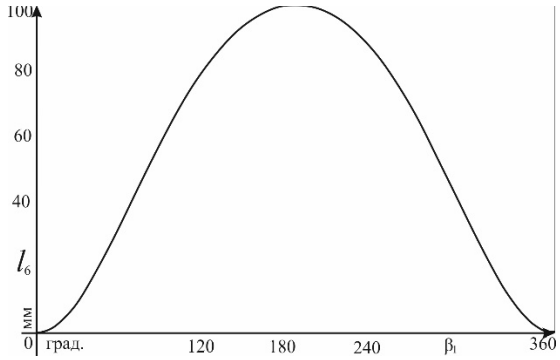


Рис. 3. Размерный диапазон длины звена 6

Размер звена 6 уже можно учитывать при результате вращения до 180 градусов, а это значит, что оптимальная длина при данных расчета составит 100 мм.

На рисунке 4 представлен диапазон подбора значения правого шарнира стойки звена 6, который сообщает по данному графику что он равняется 0.

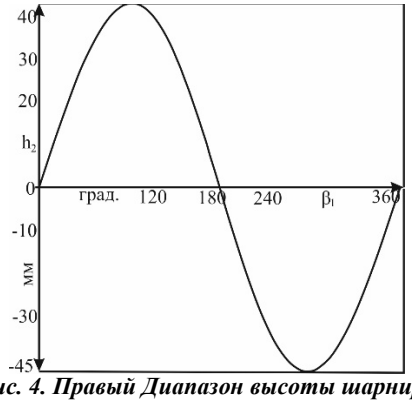


Рис. 4. Правый Диапазон высоты шарнира

На рисунке 5 представлен левый диапазон шарнира, который также равняется именно 0. Для выявления и понимания о том, что описывается, следует ориентироваться на оборот угла звена на 180 градусов. Если график при перемещении именно в точках 0 и 180 градусов имеет одинаковое значение значит оно является достоверным для подтверждения.

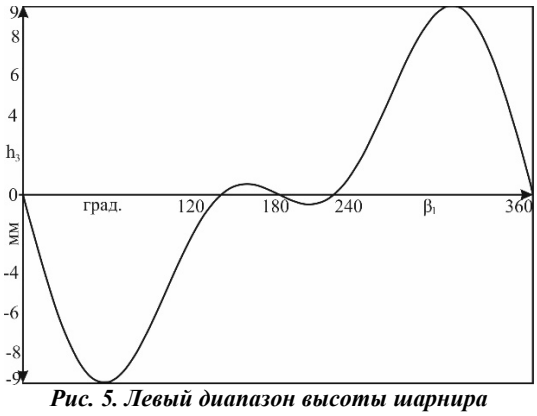


Рис. 5. Левый диапазон высоты шарнира

На рисунке 6 представлен угол наклона левого шарнира стойки. В данном случае наклон шарнира составит будет 0 градусов. Учитывая оборот в 180 градусов без разрыва графика видно, что все важные для нас точки имеют значение равное 0.

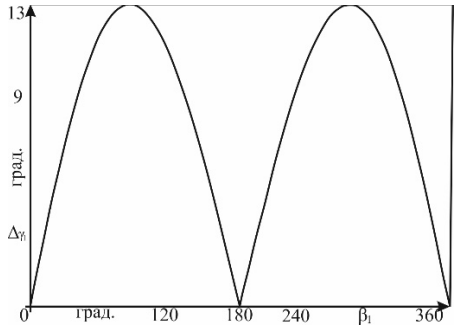


Рис. 6. Угол наклона правого шарнира

На рисунке 7 представлен угол наклона правого шарнира звена стойки. Как видно на графике угол наклона шарнира составит 180 градусов.

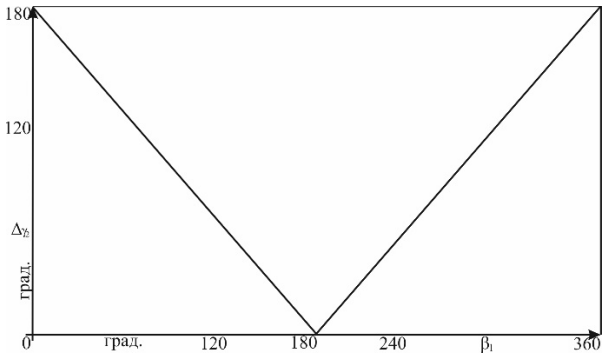


Рис. 7. Угол наклона левого шарнира

Заключение. Спроектирована схема механизма с геометрическим пространством где изображен виртуальный шарнир. Расчет проведен с возможностью перемещения и вращения виртуального шарнира. Возможность вращение виртуальных шарниров учитывает 360 градусов полного оборота.

Все исследование подводиться к основанию механизма, а именно к стойке. Вся зависимость параметров шестизвенного механизма из двух Беннеттов исследована подведением значений параметров через угол Бетта, который позволяет совершать в пространстве звеньям перемещение. В данном случае исследована возможность подбора длины стойки звена, угол наклона пространственного построения звеньев, угол наклона правого и левого шарнира, высота расположения правого и левого шарнира проектированного звена.

Список литературы

1. Кесель Л. Г. Влияние деформации плоского зеркала коаксиального лазера на характеристики выходного излучения // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 15–20.

2. Батищева К. А., Вымпина Ю. Н. Влияние способа обработки алюминиево-магниевого сплава на структуру кольцевых осадков, формирующихся при испарении капель коллоидных растворов // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 31–33.

3. Ефремова Е. С., Мифтахов Б. И., Солдаткина К. В. Имитационное моделирование неподвижного приемника вихревой системы воздушных сигналов // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева 2021. Т. 77, № 1. С. 102–108.

4. Иванов В. К. К задаче аналитического проектирования мехатронных систем // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева 202. Т. 77, № 1. С. 67–70.

5. Валиуллина Д. М., Козлов В. К., Садыков Э. М. Исследование корреляций между характеристиками трансформаторного масла // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 62–66.

6. Валиев А. И., Курылев Д. В. Экспериментальная установка для исследования процесса электрохимической обработки кромок профиля пера лопаток газотурбинного двигателя // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 57–61.

7. Кесель Б. А., Кесель Л. Г. Энергоэффективность мобильной газотурбинной электростанции малой мощности для электроснабжения буровой // Вестник казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 71–75.

8. Муратаев Ф. И., Евлампьев А. В., Муратаев Т. А. Анализ причин развития стресс коррозии аустенитных сталей и сварных соединений // Вестник казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 76–81.

9. Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овально-траншейными вихрегенераторами / А. А. Миронов, С. А. Исаев, А. Н. Скрыпник, И. А. Попов, Ю. Ф. Гортышев // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12, № 9. С. 386–402.

10. Фаизов М.Р., Мудров А.П. Исследование движения сферического тренажера // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 1. С. 182–191.

11. Skrypnik A.N., Shcelchkov A.V., Gortyshov Yu.F., Popov I.A. Artifician neural networks application on friction factor and heat transfer coefficients prediction in tubes with inner helical-finning. Applied Thermal Engineering, 2022, vol. 206, p. 118049.

12. Рощин В.В., Хабибуллин Ф.Ф., Ерахмадов С.Н. К оценке температурного состояния шарикоподшипников опор гтд повышенной теплонапряженности // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2019. Т. 75, № 3. С. 66–69.

13. Моделирование динамики двухфазного потока в сепараторе / И. М. Баянов, Ю. Ф. Гортышов, В. Г. Тонконог, М. И. Тонконог // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2013. № 4. С. 34–42.

14. Lustin A.D., Egorov S.V. Defining relation of vibration of vehicle suspension with the mass and rigidity design deviations. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 44629- 44635.

15. Мудров П.Г. Пространственные механизмы с вращательными парами / Казанский сельскохозяйственный институт имени М. Горького, 1976.

16. Конструктивное моделирование процессов синтеза: монография В. А. Райхлин, И. С. Вершинин, Р. К. Классен, Р. Ф. Гибадуллин, С. В. Пыстогов. Казань: Фэн, 2020. 248 с.

17. Вершинин И.С. Методы, модели и алгоритмы конструктивной теории ассоциативной стегозащиты картографической и текстовой информации / И. С. Вершинин // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. № 3. С. 108-115. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_3_108. EDN LBOEZP.

18. Snegurenko A.P., Zaydullin S.S., Novikova S.V., Valitova N.L., Kremleva E.S. Technology of multilevel interuniversity indicators as a factor for increasing academic mobility. Experience based on russian federal educational standards. Integration of Education, 2022, vol. 26, no. 1 (106), pp. 55-71.

19. Ассоциативная стеганография текстовых сообщений / И. С. Вешинин, Р. Ф. Гибадуллин, С. В. Пыстогов, В. А. Райхлин // Вестник московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2021. № 1. С. 3–14.

20. Pikuleva N.I. Querying big graphs in data flow language / N. I. Pikuleva, A. S. Khafizova, D. A. Gashigullin // Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. Sochi, 2021. P. 455-460. DOI 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446339. EDN YVZNIN.

Фаизов Марат Рауфович, магистрант, ассистент, faizovmarat92@gamil.com, Россия, Казань , Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,

Хабибуллин Фаниль Фаргатович, канд. техн. наук, заведующий лабораторий, fanil_arsk@mail.ru, Россия, Казань , Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,

Романов Илья Александрович, студент, Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

RESEARCH OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF A SIX-BANK MECHANISM BASED ON TWO SPATIAL MECHANISMS HAVING A PARALLELEPIPED STRUCTURE

M.R. Faizov, F.F. Khabibullin, I.A. Romanov

The six-bar mechanism obtained from two Bennett mechanisms is realized by research on the basis of summing up all the parameters to its stand. The mechanism is based on standard Bennett relations. By means of ratio standards, the conditions for the possibility of implementing a rack link are specified. Its length and the angle of inclination of the spatial arrangement relative to each other of the hinges are determined. The height of the geometric heights of the right and left hinge. The angle of inclination of the heights of the right and left hinges themselves. All parameters are selected for a virtual hinge, which is an indicator of the full rotation of the entire six-link mechanism through itself.

Key words: Bennett, parallelepiped, six-bar mechanism, construction geometry.

Faizov Marat Raufovich, master's, assistant, faizovmarat92@gamil.com , Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI,

Khabibullin Fanil Fargatovich, candidate of technical sciences, head of the laboratory, fanil_arsk@mail.ru, Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI,

Romanov Ilya Aleksandrovich, student, Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI

УДК 629.1.01
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-585-589

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ТОРМОЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

И.А. Яицков, П.А. Поляков, Ю.Д. Шевцов, Е.С. Федотов

В статье проанализированы нестационарные процессы кузова транспортных средств во время замедления и предпосылки создания автоматизированной системы управления тормозной системой. В результате моделирования были получены уравнения линейных и угловых перемещений кузова транспортного средства, а также их ускорений при движении по криволинейному участку. Основными входными параметрами являлись инерционные, диссипативные и жесткостные коэффициенты кузова. Используя математический аппарат, были рассчитаны угловые перемещения тангажа и крена кузова транспортного средства с нагрузкой на правое переднее колесо во времени торможения. Предложен принцип работы адаптивной системы торможения на примере трех- и шестипоршневого суппорта.

Ключевые слова: адаптивная система торможения, тормозное устройство, угловое колебание, угловое ускорение, тангаж, крен, нагрузка на колесо.

В работе [1] приведена модель распределения тормозных усилий в двухколесном транспортном средстве в зависимости от нагрузки. Целью исследования [2] являлось разработка системы адаптивного круиз-контроля на основе алгоритма активного торможения с использованием иерархического управления. В диссертации [3] предложен алгоритм управления тормозной системой, на основе учета жесткости эластичной покрышки колеса. Учет параметров покрышки позволяет проводить робастную оценку состояний системы при наличии неопределенностей и внешних возмущений. В статье [4] предложена модель адаптивной тормозной системы с перенастройкой по мощности торможения. Основным входным параметром модели управления является усилие на органе управления тормозной системы. В работе [5] было проведено имитационное моделирование служебного торможения с идентичными усилиями на педали тормоза и таймингом его приложения для различных состояний автобуса МАЗ-256. Строились диаграммы тормозного усилия в зависимости от давления в тормозной магистрали при порожнем и груженном состояниях автобуса. Как приводят авторы исследования механические регуляторы не срабатывают при различных состояниях автобуса, а влияние на тормозную нагрузку усилие на педали, создаваемое водителем. В работе [6] была построена модель динамики транспортного средства, включающая семь степеней свободы. На основе кривой распределения тормозных усилий и правил ЕЭК была сформулирована стратегия адаптивного управления распределением тормозного усилия путем принятия максимального момента рекуперативного торможения в качестве точки перегиба, коэффициента синхронного сцепления в качестве желаемой точки и аккумулятора, коэффициента сцепления с дорогой и силы торможения в качестве порога. Результаты моделирования подтвердили осуществимость предложенной стратегии управления адаптивным распределением тормозного усилия. Исследование показало, что стратегия адаптивного распределения может лучше адаптироваться к сложным и изменяющимся условиям вождения транспортного средства, комбинируя точку перегиба и желаемую точку. Коэффициенты рекуперации энергии торможения в условиях циклов NEDC и NYCC на дороге с высоким сцеплением составили 52,62% и 47,45%.

Проанализированные источники дают возможность оценить начало поиска связи между параметрами нестационарных процессов транспортного средства и с его тормозным усилием. Величина тормозного момента на колесе должна соответствовать нагрузки, приходящейся на это колесо. Следовательно, динамическая модель распределения тормозных моментов на колесах должна соответствовать динамической модели изменения кузова. При движении транспортного средства по криволинейной траектории его масса перераспределяется неравномерно не только между осями, но и между колесами одной оси. Ввиду этого необходимо учитывать линейные (z, x, y) и угловые ($\varphi_т$, $\varphi_к$, $\varphi_р$) перемещения кузова транспортного средства. В результате перераспределяемая масса $m_{пм}$ транспортного средства будет иметь не только продольное смещение $x_п$, но и поперечное $y_п$. Связь между $m_{пм}$ и кузовом транспортного средства учитывается с помощью коэффициентов диссипации и жесткостей в продольном ($b_{пмх}$, $c_{пмх}$) и поперечном ($b_{пму}$, $c_{пму}$) направлениях. На рис. 1 обозначен черным цветом центр масс кузова в статическом положении, расположенный на оси Z на расстоянии h от опорной поверхности.

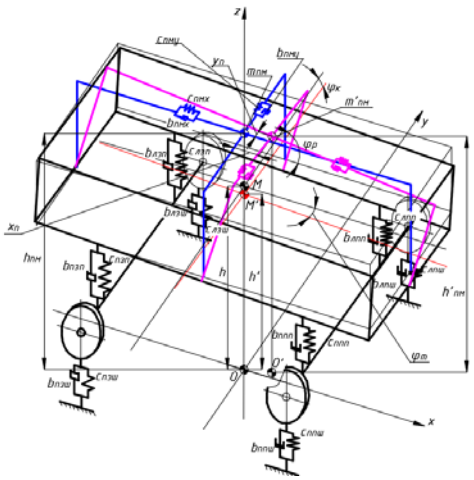


Рис. 1. Динамическая модель транспортного средства при заторможенном состоянии движущегося по криволинейной траектории

Как и в случае описания динамики автопоезда в процессе торможения [7] динамическая модель кузова транспортного средства имеет продольный наклон, обозначенный углом тангажа ($\varphi_т$), и поперечный наклон, обозначенный углами крена ($\varphi_к$) и рыскания ($\varphi_р$). Центр масс кузова транспортного средства (обозначен красным цветом) при торможении стремится вниз вдоль оси *Z*. Перераспределяемая масса $m_{пм}$ (обозначена синим цветом) из положения центра масс после начала торможения смещается в сторону передней оси и в сторону периферии радиуса поворота (обозначена фиолетовым цветом).

На плоскости *XOY* центр масс будет обозначен точкой *O*, тогда как перераспределяемая масса будет иметь точку O' на плоскости.

В результате чего уравнение неустановившегося движения транспортного средства при заторможенном состоянии, используя уравнения Лагранжа II рода:

$$
\begin{cases}
(M+m_{пм})\ddot{x}+m_{пм}\ddot{\varphi}_т\left(h'_{пм}-h'\right)-m_{пм}\ddot{\varphi}_р y_п-b_{пмх}\dot{x}\cos\varphi_т-c_{пмх}x\cos\varphi_т-b_{пмт}\left(h'_{пм}-h'\right)\dot{\varphi}_т\cos\varphi_т-\\
-c_{пмт}\left(h'_{пм}-h'\right)\varphi_т\cos\varphi_т-b_{пму}y_п\dot{\varphi}_р\cos\varphi_р-c_{пму}y_п\varphi_р\cos\varphi_р=\varphi_с\left(b_{ппп}+b_{пшп}\right)\dot{Z}_{пп}+\varphi_с\left(b_{ппп}+b_{пшп}\right)\dot{Z}_{зп}+\\
+\varphi_с\left(b_{ппп}+b_{пшп}\right)\dot{Z}_{пп}+\varphi_с\left(b_{ппш}+b_{пшш}\right)\dot{Z}_{зп}+\varphi_с\frac{c_{ппп}c_{пшп}}{c_{ппп}+c_{пшп}}Z_{пп}+\varphi_с\frac{c_{зпп}c_{зшп}}{c_{зпп}+c_{зшп}}Z_{зп}+\varphi_с\frac{c_{ппш}c_{пшш}}{c_{ппш}+c_{пшш}}Z_{пз}+\\
+\varphi_с\frac{c_{зпш}c_{зшш}}{c_{зпш}+c_{зшш}}Z_{зз};\\
\left(M+m_{пм}\right)\ddot{y}-m_{пм}\ddot{\varphi}_к\left(h'_{пм}-h'\right)-m_{пм}\ddot{\varphi}_р x_п+b_{пму}\dot{y}\cos\varphi_к+c_{пму}y\cos\varphi_к+b_{пму}\left(h'_{пм}-h'\right)\dot{\varphi}_к\cos\varphi_к+\\
+c_{пму}\left(h'_{пм}-h'\right)\varphi_к\cos\varphi_к-b_{пмх}x_п\dot{\varphi}_р\sin\varphi_р-c_{пмх}x_п\varphi_р\sin\varphi_р=\varphi_с\left(b_{ппп}+b_{пшп}\right)\dot{Z}_{пп}+\varphi_с\left(b_{ппш}+b_{пшш}\right)\dot{Z}_{зп}+\\
+\varphi_с\left(b_{ппп}+b_{пшп}\right)\dot{Z}_{пп}+\varphi_с\left(b_{ппш}+b_{пшш}\right)\dot{Z}_{зп}+\varphi_с\frac{c_{ппп}c_{пшп}}{c_{ппп}+c_{пшп}}Z_{пп}+\varphi_с\frac{c_{зпп}c_{зшп}}{c_{зпп}+c_{зшп}}Z_{зп}+\varphi_с\frac{c_{ппш}c_{пшш}}{c_{ппш}+c_{пшш}}Z_{пз}+\\
+\varphi_с\frac{c_{зпш}c_{зшш}}{c_{зпш}+c_{зшш}}Z_{зз};\\
-\left(M+m_{пм}\right)\left(g-\ddot{z}\right)+m_{пм}\ddot{\varphi}_м x_п+m_{пм}\ddot{\varphi}_к y_п-b_{пмz}\dot{z}\sin\varphi_т-c_{пмz}z\sin\varphi_т-b_{пмх}x_п\dot{\varphi}_т\sin\varphi_т-c_{пмх}x_п\varphi_т\sin\varphi_т+\\
+b_{пму}y_п\dot{\varphi}_к\sin\varphi_к+c_{пму}y_п\varphi_к\sin\varphi_к=\left(b_{ппп}+b_{пшп}\right)\dot{Z}_{пп}+\left(b_{ппш}+b_{пшш}\right)\dot{Z}_{зп}+\left(b_{зпп}+b_{зшп}\right)\dot{Z}_{зз}+\\
+\frac{c_{ппп}c_{пшп}}{c_{ппп}+c_{пшп}}Z_{пп}+\frac{c_{зпп}c_{зшп}}{c_{зпп}+c_{зшп}}Z_{зп}+\frac{c_{ппш}c_{пшш}}{c_{ппш}+c_{пшш}}Z_{пз}+\frac{c_{зпш}c_{зшш}}{c_{зпш}+c_{зшш}}Z_{зз};\\
m_{пм}\left(g-\ddot{z}\right)x_п+m_{пм}\ddot{x}\left(h'_{пм}-h'\right)+m_{пм}\ddot{\varphi}_т\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+x_п^2\right]+J\ddot{\varphi}_т-b_{пмх}\dot{x}\left(h'_{пм}-h'\right)-c_{пмх}x\left(h'_{пм}-h'\right)-c_{пмх}x_п z-\\
-b_{пмх}x_п\dot{z}-b_{пмх}\dot{\varphi}_т\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+x_п^2\right]-c_{пмх}\varphi_т\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+x_п^2\right]=\left[\left(b_{ппп}+b_{пшп}\right)\left(\begin{matrix}\left[a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right]\sin\varphi_р+\\+\frac{a_{пп}}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]\dot{Z}_{пп}+\\
+\left[\left(\frac{c_{ппп}c_{пшп}}{c_{ппп}+c_{пшп}}\right)\left(\begin{matrix}\left[a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right]\sin\varphi_р+\\+\frac{a_{пп}}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]Z_{пп}+\left[\left(b_{ппш}+b_{пшш}\right)\left(\begin{matrix}\left[a_{пп}-a\mathrm{tg}\varphi_р\right]\cos\varphi_р+\\+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]\dot{Z}_{пп}+\\
+\left[\left(\frac{c_{зпп}c_{зшп}}{c_{зпп}+c_{зшп}}\right)\left(\begin{matrix}\left[a_{пп}-a\mathrm{tg}\varphi_р\right]\cos\varphi_р+\\+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]Z_{зп}+\left[\left(b_{зпп}+b_{зшп}\right)\left(\begin{matrix}\left[b_{зп}-b\mathrm{tg}\varphi_р\right]\cos\varphi_р+\\+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]\dot{Z}_{зп}+\\
\ldots
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\ldots\\
+\left[\left(\frac{c_{зпп}c_{зшп}}{c_{зпп}+c_{зшп}}\right)\left(\begin{matrix}\left[b_{зп}-b\mathrm{tg}\varphi_р\right]\cos\varphi_р+\\+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]Z_{пз}+\left[\left(b_{зпш}+b_{зшш}\right)\left(\begin{matrix}\left[b-b_{зп}\mathrm{tg}\varphi_р\right]\sin\varphi_р+\\+\frac{b_{зп}}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]\dot{Z}_{зз}+\\
+\left[\left(\frac{c_{зпп}c_{зшп}}{c_{зпп}+c_{зшп}}\right)\left(\begin{matrix}\left[b-b_{зп}\mathrm{tg}\varphi_р\right]\sin\varphi_р+\\+\frac{b_{зп}}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]Z_{зз};\\
-m_{пм}y_п\left(g-\ddot{z}\right)-m_{пм}\ddot{y}\left(h'_{пм}-h'\right)+J\ddot{\varphi}_к-m_{пм}\ddot{\varphi}_к\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+y_п^2\right]+b_{пму}\dot{y}\left(h'_{пм}-h'\right)+\\
+c_{пму}y\left(h'_{пм}-h'\right)+c_{пму}y_п z+b_{пму}y_п\dot{z}+b_{пму}\dot{\varphi}_к\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+y_п^2\right]-c_{пму}\varphi_к\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+y_п^2\right]=\\
=\left[\left(b_{ппп}+b_{пшп}\right)\left(\begin{matrix}\left(a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р+\\+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]\dot{Z}_{пп}+\left[\left(\frac{c_{ппп}c_{пшп}}{c_{ппп}+c_{пшп}}\right)\left(\begin{matrix}\left(a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р+\\+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]Z_{пп}+\\
+\left[\left(b_{ппш}+b_{пшш}\right)\left(\begin{matrix}\frac{a}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'+\\+\left(a_{пп}-a\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р\end{matrix}\right)\right]\dot{Z}_{зп}+\left[\left(\frac{c_{ппп}c_{пшп}}{c_{ппп}+c_{пшп}}\right)\left(\begin{matrix}\frac{a}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'+\\+\left(a_{пп}-a\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р\end{matrix}\right)\right]Z_{зп}+\\
+\left[\left(b_{зпш}+b_{зшш}\right)\left(\begin{matrix}\frac{b}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'+\\+\left(b_{зп}-b\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р\end{matrix}\right)\right]\dot{Z}_{пз}+\left[\left(\frac{c_{ппш}c_{пшш}}{c_{ппш}+c_{пшш}}\right)\left(\begin{matrix}\frac{b}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'+\\+\left(b_{зп}-b\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р\end{matrix}\right)\right]Z_{пз}+\\
+\left[\left(b_{зпш}+b_{зшш}\right)\left(\begin{matrix}\left(b-b_{зп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р+\\+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]\dot{Z}_{зз}+\left[\left(\frac{c_{зпш}c_{зшш}}{c_{зпш}+c_{зшш}}\right)\left(\begin{matrix}\left(b-b_{зп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р+\\+\varphi_с h'\end{matrix}\right)\right]Z_{зз};\\
-m_{пм}\ddot{y}x_п+m_{пм}\ddot{x}y_п+J\ddot{\varphi}_р-m_{пм}\ddot{\varphi}_р\left[x_п^2+y_п^2\right]+b_{пму}x_п\dot{y}+c_{пму}x_п y-b_{пмх}y_п\dot{x}-c_{пмх}y_п x+\\
+b_{пму}\dot{\varphi}_р\left[x_п^2+y_п^2\right]+c_{пму}\varphi_р\left[x_п^2+y_п^2\right]=\\
=\varphi_с\left[\begin{matrix}\left(a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р+\\+\frac{a_{пп}}{\cos\varphi_р}+\\+\left(a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р\end{matrix}\right]\left(b_{ппп}+b_{пшп}\right)\dot{Z}_{пп}+\varphi_с\left[\begin{matrix}\left(a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р+\\+\frac{a_{пп}}{\cos\varphi_р}+\\+\left(a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р\end{matrix}\right]\left(\frac{c_{ппп}c_{пшп}}{c_{ппп}+c_{пшп}}\right)Z_{пп}+\\
+\varphi_с\left[\begin{matrix}\frac{a}{\cos\varphi_р}+\\+\left(a_{пп}-a\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р+\\+\left(a_{пп}-a\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р\end{matrix}\right]\left(b_{ппш}+b_{пшш}\right)\dot{Z}_{зп}+\varphi_с\left[\begin{matrix}\frac{a}{\cos\varphi_р}+\\+\left(a_{пп}-a\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р+\\+\left(a_{пп}-a\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р\end{matrix}\right]\left(\frac{c_{зпп}c_{зшп}}{c_{зпп}+c_{зшп}}\right)Z_{зп}+\\
+\varphi_с\left[\begin{matrix}\frac{b}{\cos\varphi_р}+\\+\left(b_{зп}-b\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р+\\+\left(b_{зп}-b\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р\end{matrix}\right]\left(b_{ппш}+b_{пшш}\right)\dot{Z}_{пз}+\varphi_с\left[\begin{matrix}\frac{b}{\cos\varphi_р}+\\+\left(b_{зп}-b\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р+\\+\left(b_{зп}-b\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р\end{matrix}\right]\left(\frac{c_{зпш}c_{зшш}}{c_{зпш}+c_{зшш}}\right)Z_{пз}+\\
\ldots
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\ldots\\
+\varphi_с\left[\begin{matrix}\left(b-b_{зп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р+\\+\frac{b_{зп}}{\cos\varphi_р}+\\+\left(b-b_{зп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р\end{matrix}\right]\left(b_{зпш}+b_{зшш}\right)\dot{Z}_{зз}+\varphi_с\left[\begin{matrix}\left(b-b_{зп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р+\\+\frac{b_{зп}}{\cos\varphi_р}+\\+\left(b-b_{зп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р\end{matrix}\right]\left(\frac{c_{зпш}c_{зшш}}{c_{зпш}+c_{зшш}}\right)Z_{зз}.
\end{cases}
\qquad (1)
$$

где M, J – масса и момент инерции транспортного средства, соответственно, кг и кг м^2; $h'_{пм}$ – расстояние от опорной поверхности до перераспределяемой массы, м; $\dot{Z}_{пп}$, $\dot{Z}_{лп}$, $\dot{Z}_{пз}$, $\dot{Z}_{лз}$ – скорости векторов возмущений для передних и задних левых и правых колес, м/с; $Z_{пп}$, $Z_{лп}$, $Z_{пз}$, $Z_{лз}$ – векторы возмущений для передних и задних левых и правых колес, м; $\varphi_с$ – коэффициент сцепления с опорной поверхностью; $b_{ппп}$, $b_{лпп}$, $b_{пзп}$, $b_{лзп}$ – коэффициенты демпфирования правой и левой передних и задних подвесок колес, соответственно, Нс/м; $b_{ппш}$, $b_{лпш}$, $b_{пзш}$, $b_{лзш}$ – коэффициенты демпфирования правой и левой передних и задних покрышек колес, соответственно, Нс/м; $c_{ппп}$, $c_{лпп}$, $c_{пзп}$, $c_{лзп}$ – коэффициенты жесткости правой и левой передних и задних подвесок колес, соответственно, Н/м; $c_{ппш}$, $c_{лпш}$, $c_{пзш}$, $c_{лзш}$ – коэффициенты жесткости правой и левой передних и задних покрышек колес, соответственно, Н/м; a, b – расстояние от центра масс до передней и задней осей, м; $a_{пп}$, $a_{лп}$ – расстояния от центра масс до правого и левого передних колес, соответственно, м; $b_{пз}$, $b_{лз}$ – расстояния от центра масс до правого и левого задних колес, соответственно, м.

Используя уравнение в векторно-матричной форме [8] коэффициенты которого определяются из матриц:

$$A=\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & A_{14} & 0 & A_{16} \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 & A_{25} & A_{26} \\ 0 & 0 & A_{33} & A_{34} & A_{35} & 0 \\ A_{41} & 0 & A_{43} & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & A_{52} & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ A_{61} & A_{62} & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$B=\begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 & B_{14} & 0 & B_{16} \\ 0 & B_{22} & 0 & 0 & B_{25} & B_{26} \\ 0 & 0 & B_{33} & B_{34} & B_{35} & 0 \\ B_{41} & 0 & B_{43} & B_{44} & 0 & 0 \\ 0 & B_{52} & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ B_{61} & B_{62} & 0 & 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$$C=\begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & C_{14} & 0 & C_{16} \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 & C_{25} & C_{26} \\ 0 & 0 & C_{33} & C_{34} & C_{35} & 0 \\ C_{41} & 0 & C_{43} & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & C_{52} & C_{53} & 0 & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$$D=\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

$$E=\begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & E_{14} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & E_{24} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & E_{34} \\ E_{41} & E_{42} & E_{43} & E_{44} \\ E_{51} & E_{52} & E_{53} & E_{54} \\ E_{61} & E_{62} & E_{63} & E_{64} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Коэффициенты матриц сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Коэффициенты матриц A, B, C, D и E

$A_{11}=A_{22}=A_{33}=M+m_{пм}$	$A_{14}=A_{41}=m_{пм}\left(h'_{пм}-h'\right)$	$A_{16}=-m_{пм}y_п$	$A_{25}=A_{52}-m_{пм}\left(h'_{пм}-h'\right)$	$A_{34}=m_{пм}x_п$
$A_{26}=A_{43}=A_{62}=-m_{пм}x_п$	$A_{35}=m_{пм}y_п$	$A_{44}=m_{пм}\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+x_п^2\right]+J$	$A_{55}=J-m_{пм}\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+y_п^2\right]$	
$A_{53}=A_{61}=m_{пм}y_п$	$A_{66}=J-m_{пм}\left[x_п^2+y_п^2\right]$	$B_{11}=B_{33}=-b_{пмx}\cos\varphi_т$	$B_{14}=-b_{пмx}\left(h'_{пм}-h'\right)\cos\varphi_т$	
$B_{16}=-b_{пмy}y_п\cos\varphi_р$	$B_{22}=-b_{пмy}\cos\varphi_к$	$B_{25}=-b_{пмy}\left(h'_{пм}-h'\right)\cos\varphi_т$	$B_{26}=B_{34}=-b_{пмx}x_п\sin\varphi_р$	
$B_{35}=b_{пмy}y_п\sin\varphi_к$	$B_{41}=-b_{пмx}\left(h'_{пм}-h'\right)$	$B_{43}=-b_{пмx}x_п$	$B_{44}=-b_{пмx}\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+x_п^2\right]$	$B_{53}=B_{61}=-b_{пмy}y_п$
$B_{52}=-b_{пмy}\left(h'_{пм}-h'\right)$	$B_{55}=b_{пмy}\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+y_п^2\right]$	$B_{62}=b_{пмy}x_п$	$B_{66}=b_{пмy}\left[x_п^2+y_п^2\right]$	
$C_{11}=C_{33}=-c_{пмx}\cos\varphi_т$	$C_{14}=-c_{пмx}\left(h'_{пм}-h'\right)\cos\varphi_т$	$C_{16}=-c_{пмy}y_п\cos\varphi_р$	$C_{22}=-c_{пмy}\cos\varphi_к$	
$C_{25}=-c_{пмy}\left(h'_{пм}-h'\right)\cos\varphi_т$	$C_{26}=C_{34}=-c_{пмx}x_п\sin\varphi_р$	$C_{35}=c_{пмy}y_п\sin\varphi_к$	$C_{41}=-c_{пмx}\left(h'_{пм}-h'\right)$	
$C_{43}=-c_{пмx}x_п$	$C_{44}=-c_{пмx}\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+x_п^2\right]$	$C_{53}=C_{61}=-c_{пмy}y_п$	$C_{52}=-c_{пмy}\left(h'_{пм}-h'\right)$	$C_{66}=c_{пмy}\left[x_п^2+y_п^2\right]$
$C_{62}=c_{пмy}x_п$	$C_{55}=c_{пмy}\left[\left(h'_{пм}-h'\right)^2+y_п^2\right]$	$D_{11}=D_{21}=\varphi_с\left(b_{ппп}+b_{ппш}\right)$	$D_{12}=D_{22}=\varphi_с\left(b_{лпп}+b_{лпш}\right)$	
$D_{13}=D_{23}=\varphi_с\left(b_{пзп}+b_{пзш}\right)$	$D_{14}=D_{24}=\varphi_с\left(b_{лзп}+b_{лзш}\right)$	$D_{31}=\left(b_{ппп}+b_{ппш}\right)$	$D_{32}=\left(b_{лпп}+b_{лпш}\right)$	$D_{33}=\left(b_{пзп}+b_{пзш}\right)$
$D_{34}=\left(b_{лзп}+b_{лзш}\right)$	$D_{41}=\left(b_{ппп}+b_{ппш}\right)\left(\left[a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right]\sin\varphi_р+\frac{a_{пп}}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'\right)$	$D_{42}=\left(b_{лпп}+b_{лпш}\right)\times$ $\times\left(\left[a_{лп}-a\mathrm{tg}\varphi_р\right]\cos\varphi_р+\varphi_с h'\right)$		
$D_{43}=\left(b_{пзп}+b_{пзш}\right)\left(\left[b_{пз}-b\mathrm{tg}\varphi_р\right]\cos\varphi_р+\varphi_с h'\right)$	$D_{44}=\left(b_{лзп}+b_{лзш}\right)\left[\left(b-b_{лз}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р+\frac{b_{лз}}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'\right]$			
$D_{51}=\left(b_{ппп}+b_{ппш}\right)\left(\left[a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right]\cos\varphi_р+\varphi_с h'\right)$	$D_{52}=\left(b_{лпп}+b_{лпш}\right)\left(\left[a_{лп}-a\mathrm{tg}\varphi_р\right]\sin\varphi_р+\varphi_с h'+\frac{a}{\cos\varphi_р}\right)$			
$D_{54}=\left(b_{лзп}+b_{лзш}\right)\left[\left(b-b_{лз}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р+\varphi_с h'\right]$	$D_{53}=\left(b_{пзп}+b_{пзш}\right)\left[\frac{b}{\cos\varphi_р}+\varphi_с h'+\left(b_{пз}-b\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р\right]$			
$D_{61}=\varphi_с\left[\left(a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\sin\varphi_р+\frac{a_{пп}}{\cos\varphi_р}+\left(a-a_{пп}\mathrm{tg}\varphi_р\right)\cos\varphi_р\right]\left(b_{ппп}+b_{ппш}\right)$	$E_{11}=E_{21}=\varphi_с\, c_{ппп}c_{ппш}/\left(c_{ппп}+c_{ппш}\right)$			

$$D_{62}=\varphi_{\text{с}}\left[\frac{a}{\cos\varphi_{\text{р}}}+\left(a_{\text{пл}}-a\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}+\left(a_{\text{пл}}-a\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}\right]\left(b_{\text{лпп}}+b_{\text{лпш}}\right)$$

$$E_{12}=E_{22}=\varphi_{\text{с}}\,c_{\text{лпп}}c_{\text{лпш}}/\left(c_{\text{лпп}}+c_{\text{лпш}}\right)$$

$$D_{63}=\varphi_{\text{с}}\left[\frac{b}{\cos\varphi_{\text{р}}}+\left(b_{\text{пз}}-b\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}+\left(b_{\text{пз}}-b\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}\right]\left(b_{\text{пзп}}+b_{\text{пзш}}\right)$$

$$E_{13}=E_{23}=\varphi_{\text{с}}\,c_{\text{зпп}}c_{\text{зпш}}/\left(c_{\text{зпп}}+c_{\text{зпш}}\right)$$

$$D_{64}=\varphi_{\text{с}}\left[\left(b-b_{\text{лз}}\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}+\frac{b_{\text{лз}}}{\cos\varphi_{\text{р}}}+\left(b-b_{\text{лз}}\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}\right]\left(b_{\text{лзп}}+b_{\text{лзш}}\right)$$

$$E_{14}=E_{24}=\varphi_{\text{с}}\,c_{\text{лзп}}c_{\text{лзш}}/\left(c_{\text{лзп}}+c_{\text{лзш}}\right)$$

$$E_{41}=\left(\frac{c_{\text{ппп}}c_{\text{ппш}}}{c_{\text{ппп}}+c_{\text{ппш}}}\right)\left[\left(a-a_{\text{пп}}\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}+\frac{a_{\text{пп}}}{\cos\varphi_{\text{р}}}+\varphi_{\text{с}}h'\right]$$

$$E_{31}=\frac{c_{\text{ппп}}c_{\text{ппш}}}{c_{\text{ппп}}+c_{\text{ппш}}}$$

$$E_{32}=\frac{c_{\text{лпп}}c_{\text{лпш}}}{c_{\text{лпп}}+c_{\text{лпш}}}$$

$$E_{33}=\frac{c_{\text{зпп}}c_{\text{зпш}}}{c_{\text{зпп}}+c_{\text{зпш}}}$$

$$E_{42}=\left(\frac{c_{\text{лпп}}c_{\text{лпш}}}{c_{\text{лпп}}+c_{\text{лпш}}}\right)\left[\left(a_{\text{лп}}-a\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}+\varphi_{\text{с}}h'\right]$$

$$E_{34}=\frac{c_{\text{лзп}}c_{\text{лзш}}}{c_{\text{лзп}}+c_{\text{лзш}}}$$

$$E_{43}=\left(\frac{c_{\text{зпп}}c_{\text{зпш}}}{c_{\text{зпп}}+c_{\text{зпш}}}\right)\left[\left(b_{\text{пз}}-b\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}+\varphi_{\text{с}}h'\right]$$

$$E_{44}=\left(\frac{c_{\text{лзп}}c_{\text{лзш}}}{c_{\text{лзп}}+c_{\text{лзш}}}\right)\left[\left(b-b_{\text{зл}}\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}+\frac{b_{\text{зл}}}{\cos\varphi_{\text{р}}}+\varphi_{\text{с}}h'\right]$$

$$E_{51}=\left(\frac{c_{\text{ппп}}c_{\text{ппш}}}{c_{\text{ппп}}+c_{\text{ппш}}}\right)\left[\left(a-a_{\text{пп}}\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}+\varphi_{\text{с}}h'\right]$$

$$E_{52}=\left(\frac{c_{\text{лпп}}c_{\text{лпш}}}{c_{\text{лпп}}+c_{\text{лпш}}}\right)\left[\frac{a}{\cos\varphi_{\text{р}}}+\varphi_{\text{с}}h'+\left(a_{\text{лп}}-a\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}\right]$$

$$E_{53}=\left(\frac{c_{\text{зпп}}c_{\text{зпш}}}{c_{\text{зпп}}+c_{\text{зпш}}}\right)\left[\frac{b}{\cos\varphi_{\text{р}}}+\varphi_{\text{с}}h'+\left(b_{\text{пз}}-b\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}\right]$$

$$E_{54}=\left(c_{\text{лзп}}c_{\text{лзш}}/\left[c_{\text{лзп}}+c_{\text{лзш}}\right]\right)\left[\left(b-b_{\text{лз}}\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}+\varphi_{\text{с}}h'\right]$$

$$E_{61}=\varphi_{\text{с}}\left[\left(a-a_{\text{пп}}\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}+a_{\text{пп}}/\cos\varphi_{\text{р}}+\left(a-a_{\text{пп}}\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}\right]\left(c_{\text{ппп}}c_{\text{ппш}}/\left[c_{\text{ппп}}+c_{\text{ппш}}\right]\right)$$

$$E_{62}=\varphi_{\text{с}}\left[a/\cos\varphi_{\text{р}}+\left(a_{\text{лп}}-a\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}+\left(a_{\text{лп}}-a\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}\right]\left(c_{\text{лпп}}c_{\text{лпш}}/\left[c_{\text{лпп}}+c_{\text{лпш}}\right]\right)$$

$$E_{63}=\varphi_{\text{с}}\left[b/\cos\varphi_{\text{р}}+\left(b_{\text{пз}}-b\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}+\left(b_{\text{пз}}-b\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}\right]\left(c_{\text{зпп}}c_{\text{зпш}}/\left[c_{\text{зпп}}+c_{\text{зпш}}\right]\right)$$

$$E_{64}=\varphi_{\text{с}}\left[\left(b-b_{\text{лз}}\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\sin\varphi_{\text{р}}+b_{\text{лз}}/\cos\varphi_{\text{р}}+\left(b-b_{\text{лз}}\text{tg}\varphi_{\text{р}}\right)\cos\varphi_{\text{р}}\right]\left(c_{\text{лзп}}c_{\text{лзш}}/\left[c_{\text{лзп}}+c_{\text{лзш}}\right]\right)$$

Запишем систему уравнений колебательной системы в общем виде относительно линейных (z, x, y) и угловых ($\varphi_{\text{т}}$, $\varphi_{\text{к}}$, $\varphi_{\text{р}}$) координат:

$$\begin{cases}
m_{\text{пр1}}\dfrac{d^2x}{d\tau^2}+c_{\text{пр1}}x+b_{\text{пр1}}\dfrac{dx}{d\tau}=M_{\text{впп}}+M_{\text{влп}}+M_{\text{впз}}+M_{\text{влз}},\\
m_{\text{пр2}}\dfrac{d^2y}{d\tau^2}+c_{\text{пр2}}y+b_{\text{пр2}}\dfrac{dy}{d\tau}=M_{\text{впп}}+M_{\text{влп}}+M_{\text{впз}}+M_{\text{влз}},\\
m_{\text{пр3}}\dfrac{d^2z}{d\tau^2}+c_{\text{пр3}}z+b_{\text{пр3}}\dfrac{dz}{d\tau}=M_{\text{впп}}+M_{\text{влп}}+M_{\text{впз}}+M_{\text{влз}},\\
J_{\text{пр1}}\dfrac{d^2\varphi_{\text{т}}}{d\tau^2}+c_{\text{пр4}}\varphi_{\text{т}}+b_{\text{пр4}}\dfrac{d\varphi_{\text{т}}}{d\tau}=M_{\text{впп}}+M_{\text{влп}}+M_{\text{впз}}+M_{\text{влз}},\\
J_{\text{пр2}}\dfrac{d^2\varphi_{\text{к}}}{d\tau^2}+c_{\text{пр5}}\varphi_{\text{к}}+b_{\text{пр5}}\dfrac{d\varphi_{\text{к}}}{d\tau}=M_{\text{впп}}+M_{\text{влп}}+M_{\text{впз}}+M_{\text{влз}},\\
J_{\text{пр3}}\dfrac{d^2\varphi_{\text{р}}}{d\tau^2}+c_{\text{пр6}}\varphi_{\text{р}}+b_{\text{пр6}}\dfrac{d\varphi_{\text{р}}}{d\,\text{t}}=M_{\text{впп}}+M_{\text{влп}}+M_{\text{впз}}+M_{\text{влз}},
\end{cases}\tag{7}$$

где $M_{\text{впп}}$, $M_{\text{влп}}$, $M_{\text{впз}}$, $M_{\text{влз}}$ – возмущающие моменты правых и левых передних и задних колес;

Решения уравнений колебательной системы в общем виде:

$$\begin{cases}
x=e^{-\frac{b_{\text{пр1}}\tau}{m_{\text{пр1}}}}\left(\dfrac{\left(\dfrac{b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)x_0}{\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2}}\sin\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\tau+\right.\\
\left.+x_0\cos\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр1}}}{m_{пр1}}\right)^2}\right]\tau\right)+\begin{pmatrix}k_{11}\sin\left[\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в11}}\right]+\\+k_{12}\sin\left[\omega_{\text{влп}}\tau-\psi_{\text{в12}}\right]+\\+k_{13}\sin\left[\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в13}}\right]+\\+k_{14}\sin\left[\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в14}}\right]\end{pmatrix},\\
y=e^{-\frac{b_{\text{пр2}}\tau}{m_{\text{пр2}}}}\left(\dfrac{\left(\dfrac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)y_0}{\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2}}\sin\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\tau+\right.\\
\left.+y_0\cos\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\tau\right)+\begin{pmatrix}k_{21}\sin\left[\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в21}}\right]+\\+k_{22}\sin\left[\omega_{\text{влп}}\tau-\psi_{\text{в22}}\right]+\\+k_{23}\sin\left[\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в23}}\right]+\\+k_{24}\sin\left[\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в24}}\right]\end{pmatrix},\\
\ldots
\end{cases}$$

$$
\begin{cases}
\ldots \\
z = e^{-\frac{b_{\text{пр3}}\tau}{m_{\text{пр3}}}}\left(\dfrac{\left(\dfrac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)z_0}{\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2}}\sin\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\tau+ z_0\cos\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\tau\right)+\begin{pmatrix}k_{31}\sin\left[\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в31}}\right]+\\+k_{32}\sin\left[\omega_{\text{впл}}\tau-\psi_{\text{в32}}\right]+\\+k_{33}\sin\left[\omega_{\text{взп}}\tau-\psi_{\text{в33}}\right]+\\+k_{34}\sin\left[\omega_{\text{взл}}\tau-\psi_{\text{в34}}\right]\end{pmatrix}, \\
\varphi_{\text{т}} = e^{-\frac{b_{\text{пр4}}\tau}{J_{\text{пр1}}}}\left(\dfrac{\left(\dfrac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)\varphi_{\text{т0}}}{\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2}}\sin\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\tau+ \varphi_{\text{т0}}\cos\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\tau\right)+\begin{pmatrix}k_{41}\sin\left[\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в41}}\right]+\\+k_{42}\sin\left[\omega_{\text{влп}}\tau-\psi_{\text{в42}}\right]+\\+k_{43}\sin\left[\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в43}}\right]+\\+k_{44}\sin\left[\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в44}}\right]\end{pmatrix}, \\
\varphi_{\text{к}} = e^{-\frac{b_{\text{пр5}}\tau}{J_{\text{пр2}}}}\left(\dfrac{\left(\dfrac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)\varphi_{\text{к0}}}{\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2}}\sin\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\tau+ \varphi_{\text{к0}}\cos\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\tau\right)+\begin{pmatrix}k_{51}\sin\left[\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в51}}\right]+\\+k_{52}\sin\left[\omega_{\text{влп}}\tau-\psi_{\text{в52}}\right]+\\+k_{53}\sin\left[\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в53}}\right]+\\+k_{54}\sin\left[\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в54}}\right]\end{pmatrix}, \\
\varphi_{\text{р}} = e^{-\frac{b_{\text{пр6}}\tau}{J_{\text{пр3}}}}\left(\dfrac{\left(\dfrac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)\varphi_{\text{р0}}}{\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2}}\sin\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\tau+ \varphi_{\text{р0}}\cos\left[\sqrt{\left(\dfrac{c_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\dfrac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\tau\right)+\begin{pmatrix}k_{61}\sin\left[\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в61}}\right]+\\+k_{62}\sin\left[\omega_{\text{влп}}\tau-\psi_{\text{в62}}\right]+\\+k_{63}\sin\left[\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в63}}\right]+\\+k_{64}\sin\left[\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в64}}\right]\end{pmatrix}.
\end{cases} \tag{8}
$$

где $m_{\text{пр}i}$, $J_{\text{пр}i}$ – приведенные инерционные коэффициенты в зависимости от i-го направления действия колебаний, кг и кг м^2; $b_{\text{пр}i}$ – приведенные диссипативные коэффициенты в зависимости от i-го направления действия колебаний, (Нс)/м; $c_{\text{пр}i}$ – приведенные жесткостные коэффициенты в зависимости от i-го направления действия колебаний, Н/м; k_{ij} – амплитуда вынужденных колебаний в зависимости от i-го направления действия колебаний и j-го колеса; $\omega_{\text{впп}}$, $\omega_{\text{влп}}$, $\omega_{\text{впз}}$, $\omega_{\text{влз}}$ – частоты вынужденных колебаний правых и левых передних и задних колес, Гц; ψ_{ij} – сдвиг фаз между амплитудой возбуждающего момента и амплитудой вызываемых этим моментом колебаний в зависимости от i-го направления действия колебаний и j-го колеса транспортного средства, град.

Величина амплитуды $k_{\text{в}i}$ и $\psi_{\text{в}i}$ определяется из формулы:

$$
k_{ij} = \frac{\left[x_0\left(y_0, z_0, \varphi_{\text{m0}}, \varphi_{\text{к0}}, \varphi_{\text{р0}}\right)\Big/ m_{\text{пр}i}(J_{\text{пр}i})\right]}{\sqrt{\left[\left(\dfrac{c_{ij}}{m_{\text{пр}i}(J_{\text{пр}i})}\right)^2-\left(\dfrac{b_{ij}}{m_{\text{пр}i}(J_{\text{пр}i})}\right)^2\right]^2+ +4\omega^2_{\text{впп(влп,впз,влз)}}\left(\dfrac{b_{ij}}{m_{\text{пр}i}(J_{\text{пр}i})}\right)^2}}, \tag{9}
$$

$$
\text{tg}\psi_{\text{в}ij} = \frac{\left[2\omega_{\text{впп(влп,впз,влз)}} b_{ij}\Big/ m_{\text{пр}i}(J_{\text{пр}i})\right]}{\sqrt{\left(\dfrac{c_{ij}}{m_{\text{пр}i}(J_{\text{пр}i})}\right)^2-\left(\dfrac{b_{ij}}{m_{\text{пр}i}(J_{\text{пр}i})}\right)^2}}, \tag{10}
$$

Индекс направления действия колебаний (i) будет составлять для продольных (1), для поперечных (2); для вертикальных (3); для угловых в плоскости *XOZ* (4); для угловых в плоскости *YOZ* (5); для угловых в плоскости *XOY*(6). Индекс (j) характеризует действия вынужденных колебаний от переднего правого (1); от переднего левого (2), от заднего правого (3), от заднего левого (4) колес транспортного средства.

Аналогично уравнениям колебаний в общем виде запишем ускорения колебаний в общем виде:

$$
\begin{cases}
\ddot{x} = e^{-\frac{b_{\text{пр1}}\tau}{m_{\text{пр1}}}}\left(\dfrac{x_0 b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\left[\dfrac{\left(\frac{b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2}}-3\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\sin\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\tau-\right.\right.\\
\left.\left.-x_0\left[\left(\frac{b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2+\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\cos\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр1}}}{m_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\tau\right)+\\
+k_{11}\omega_{\text{впп}}^2\sin\left(\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в11}}\right)+k_{12}\omega_{\text{впл}}^2\sin\left(\omega_{\text{впл}}\tau-\psi_{\text{в12}}\right)+k_{13}\omega_{\text{впз}}^2\sin\left(\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в13}}\right)+k_{14}\omega_{\text{влз}}^2\sin\left(\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в14}}\right),\\
\ddot{y} = e^{-\frac{b_{\text{пр2}}\tau}{m_{\text{пр2}}}}\left(\dfrac{y_0 b_{\text{пр2}}}{m_{пр2}}\left[\dfrac{\left(\frac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2}}-3\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\sin\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\tau-\right.\right.\\
\left.\left.-y_0\left[\left(\frac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2+\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\cos\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр2}}}{m_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\tau\right)+\\
+k_{21}\omega_{\text{впп}}^2\sin\left(\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в21}}\right)+k_{22}\omega_{\text{впл}}^2\sin\left(\omega_{\text{впл}}\tau-\psi_{\text{в22}}\right)+k_{23}\omega_{\text{впз}}^2\sin\left(\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в23}}\right)+k_{24}\omega_{\text{влз}}^2\sin\left(\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в24}}\right),\\
\ddot{z} = e^{-\frac{b_{\text{пр3}}\tau}{m_{\text{пр3}}}}\left(\dfrac{z_0 b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\left[\dfrac{\left(\frac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2}}-3\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\sin\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\tau-\right.\right.\\
\left.\left.-z_0\left[\left(\frac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2+\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\cos\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр3}}}{m_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\tau\right)\\
\ldots
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
\ldots\\
+k_{31}\omega_{\text{впп}}^2\sin\left(\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в31}}\right)+k_{32}\omega_{\text{впл}}^2\sin\left(\omega_{\text{впл}}\tau-\psi_{\text{в32}}\right)+k_{33}\omega_{\text{впз}}^2\sin\left(\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в33}}\right)+\\
+k_{34}\omega_{\text{влз}}^2\sin\left(\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в34}}\right),\\
\ddot{\varphi}_{\text{т}} = e^{-\frac{b_{\text{пр4}}\tau}{J_{\text{пр1}}}}\left(\dfrac{\varphi_{\text{т0}} b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\left[\dfrac{\left(\frac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2}}-3\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\sin\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\tau-\right.\right.\\
\left.\left.-\varphi_{\text{т0}}\left[\left(\frac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2+\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\cos\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр4}}}{J_{\text{пр1}}}\right)^2}\right]\tau\right)+\\
+k_{41}\omega_{\text{впп}}^2\sin\left(\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в41}}\right)+k_{42}\omega_{\text{впл}}^2\sin\left(\omega_{\text{влп}}\tau-\psi_{\text{в42}}\right)+k_{43}\omega_{\text{впз}}^2\sin\left(\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в43}}\right)+\\
+k_{44}\omega_{\text{влз}}^2\sin\left(\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в44}}\right),\\
\ddot{\varphi}_{\text{к}} = e^{-\frac{b_{\text{пр5}}\tau}{J_{\text{пр2}}}}\left(\dfrac{\varphi_{\text{к0}} b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\left[\dfrac{\left(\frac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2}}-3\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\sin\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\tau-\right.\right.\\
\left.\left.-\varphi_{\text{к0}}\left[\left(\frac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2+\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\cos\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр5}}}{J_{\text{пр2}}}\right)^2}\right]\tau\right)+\\
+k_{51}\omega_{\text{впп}}^2\sin\left(\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в51}}\right)+k_{52}\omega_{\text{впл}}^2\sin\left(\omega_{\text{влп}}\tau-\psi_{\text{в52}}\right)+k_{53}\omega_{\text{впз}}^2\sin\left(\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в53}}\right)+\\
+k_{54}\omega_{\text{влз}}^2\sin\left(\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в54}}\right),\\
\ddot{\varphi}_{\text{р}} = e^{-\frac{b_{\text{пр6}}\tau}{J_{\text{пр3}}}}\left(\dfrac{\varphi_{\text{р0}} b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\left[\dfrac{\left(\frac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2}}-3\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\sin\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\tau-\right.\right.\\
\left.\left.-\varphi_{\text{р0}}\left[\left(\frac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2+\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\cos\left[\sqrt{\left(\frac{c_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2-\left(\frac{b_{\text{пр6}}}{J_{\text{пр3}}}\right)^2}\right]\tau\right)+\\
+k_{61}\omega_{\text{впп}}^2\sin\left(\omega_{\text{впп}}\tau-\psi_{\text{в61}}\right)+k_{62}\omega_{\text{впл}}^2\sin\left(\omega_{\text{влп}}\tau-\psi_{\text{в62}}\right)+k_{63}\omega_{\text{впз}}^2\sin\left(\omega_{\text{впз}}\tau-\psi_{\text{в63}}\right)+\\
+k_{64}\omega_{\text{влз}}^2\sin\left(\omega_{\text{влз}}\tau-\psi_{\text{в64}}\right).
\end{cases}
\tag{11}
$$

Определим величины приведенных коэффициентов с помощью уравнивания матриц инерционных, диссипативных и жесткостных коэффициентов, векторов скоростей возмущений и векторов возмущений:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & A_{14} & 0 & A_{16} \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 & A_{25} & A_{26} \\ 0 & 0 & A_{33} & A_{34} & A_{35} & 0 \\ A_{41} & 0 & A_{43} & A_{44} & 0 & 0 \\ 0 & A_{52} & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ A_{61} & A_{62} & 0 & 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{\text{пр1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{\text{пр2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{\text{пр3}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{\text{пр1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{\text{пр2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{\text{пр3}} \end{bmatrix}.$$

Приведенные коэффициенты сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Соответствия приведенных коэффициентов уравнений (8) и (11) и коэффициентов матриц (2)-(6)

$m_{\text{пр1}}$	A_{11}	$m_{\text{пр2}}$	A_{22}	$m_{\text{пр3}}$	A_{33}	$J_{\text{пр1}}$	A_{44}	$J_{\text{пр2}}$	A_{55}	$J_{\text{пр3}}$	A_{66}
$b_{\text{пр1}}$	B_{11}	$b_{\text{пр2}}$	B_{22}	$b_{\text{пр3}}$	B_{33}	$b_{\text{пр4}}$	B_{44}	$b_{\text{пр5}}$	B_{55}	$b_{\text{пр6}}$	B_{66}
$c_{\text{пр1}}$	C_{11}	$c_{\text{пр2}}$	C_{22}	$c_{\text{пр3}}$	C_{33}	$c_{\text{пр4}}$	C_{44}	$c_{\text{пр5}}$	C_{55}	$c_{\text{пр6}}$	C_{66}
b_{11}	D_{11}	b_{12}	D_{12}	b_{13}	D_{13}	b_{14}	D_{14}	b_{21}	D_{21}	b_{22}	D_{22}
b_{23}	D_{23}	b_{24}	D_{24}	b_{31}	D_{31}	b_{32}	D_{32}	b_{33}	D_{33}	b_{34}	D_{34}
b_{41}	D_{41}	b_{42}	D_{42}	b_{43}	D_{43}	b_{44}	D_{44}	b_{51}	D_{51}	b_{52}	D_{52}
b_{53}	D_{53}	b_{54}	D_{54}	b_{61}	D_{61}	b_{62}	D_{62}	b_{63}	D_{63}	b_{64}	D_{64}
c_{11}	E_{11}	c_{12}	E_{12}	c_{13}	E_{13}	c_{14}	E_{14}	c_{21}	E_{21}	c_{22}	E_{22}
c_{23}	E_{23}	c_{24}	E_{24}	c_{31}	E_{31}	c_{32}	E_{32}	c_{33}	E_{33}	c_{34}	E_{34}
c_{41}	E_{41}	c_{42}	E_{42}	c_{43}	E_{43}	c_{44}	E_{44}	c_{51}	E_{51}	c_{52}	E_{52}
c_{53}	E_{53}	c_{54}	E_{54}	c_{61}	E_{61}	c_{62}	E_{62}	c_{63}	E_{63}	c_{64}	E_{64}

Рассмотрим изменение ускорений угловых перемещений и нагрузки на переднее правое колесо ($N_{\text{пп}}$). Время торможения составляло 37,7с. Изменения вынужденных частот $\varphi_{\text{т}}$ и $\varphi_{\text{к}}$ изменялось диапазонами [3,54;4,1] и [3,14;3,7] Гц. В качестве вводных были использованы данные опубликованные в статье [9]. Изменения суммарных ускорений $\varphi_{\text{т}}$ и $\varphi_{\text{к}}$ (рис. 2) и $N_{\text{пп}}$ на переднее правое колесо (рис. 3).

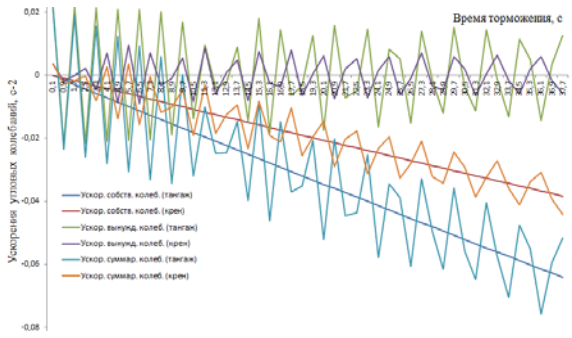


Рис. 2. Изменения φ_m и $\varphi_к$ кузова транспортного средства во времени

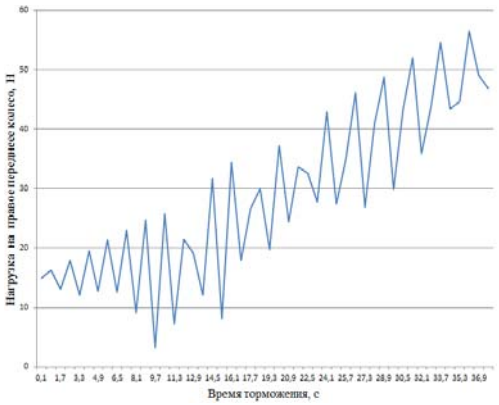


Рис. 3. Изменение $N_{пп}$ транспортного средства во времени

Полученные значения нагрузки на переднее правое колесо увеличиваются согласно нарастающим угловым ускорениям, что позволяет утверждать, что увеличивающийся на этом колесе тормозной момент будет эффективно использован для замедления транспортного средства.

Для возможности изменения тормозного момента на нагружаемом колесе необходимо либо изменять усилие прижатия колодки к тормозному диску, либо изменять радиус взаимодействия колодок. Усилие прижатия влечет перераспределение контактного давления в паре трения, на которое будет затрачено время. В дальнейшем это приведет к увеличению неравномерности износа по площади тормозной колодки. Изменение радиуса взаимодействия же позволит, не прибегая к увеличению усилия на орган управления, нарастить тормозной момент за краткий промежуток времени. Единственным недостатком может выступать скачок тормозного усилия на колесе, на которое оказывают воздействие. Для создания адаптированной системы торможения необходимо внесение изменение в конструкцию тормоза. Если первый вариант предполагает установку клапана регулирующего давления со стороны привода, то второй вариант позволяет использовать многопоршневой суппорт с отдельным управлением нескольких поршней и возможностью их отдельного включения. Рассмотрим второй вариант работы адаптированной тормозной системы на примере конструкции тормозного устройства с трех- и шестипоршневым суппортом (рис. 4 *а*, *б*).

Для начала необходимо разделить изменение нагрузки на колесо на две зоны: первая определяется нарастающей знакопеременной амплитудой нагрузки относительно статичной нагрузки, а вторая определяется резким ростом нагрузки приходящейся на колесо. Первая характеризуется отрезком времени от начала колебания до 12с, тогда как вторая обозначена отрезком от 12с до окончания колебания. Следовательно, тормозной момент должен поразному подводиться к нагруженному колесу. Т.е. во второй зоне величина тормозного момента должна быть больше, чем тормозной момент по модулю впервой зоне. Для реализации увеличения тормозного момента необходимо прибегнуть к методу определения положения центра давления в многопоршневом суппорте [10]. Согласно литературному источнику в статической модели для двух поршней, расположенных на равном удалении от оси, точка A_{12}

характеризует нахождение положение центра давления (обозначена синим цветом) (рис. 4 *а*). При включении третьего поршня положение центра давления смещается в точку A_{123} (обозначена красным цветом). Рост радиуса взаимодействия подтверждает возможность изменения тормозного момента в связи с увеличением нагрузки на тормозящее колесо (переход из первой зоны во вторую).

а *б*

Рис. 4 а, б. Тормозные устройства с трех- (а) и шестипоршневым (б) суппортом

Если рассматривать шестипоршневой суппорт (рис. 4 *б*) точка положения центра давления от действия 1, 3 и 5 поршней в статической модели (точка A_{135}) находится ниже, чем точка центра давления при одновременном срабатывании шести поршней (A_{123456}). При прижатии 2, 4 и 6 поршнями к тормозной колодки центр давления перемещается в точку A_{246}, что позволяет увеличить радиус взаимодействия и, соответственно, тормозной момент в интервале перехода из первой зоны нагрузки на колесо во вторую. Таким образом используя управление привода различными поршнями, возможно адаптировать тормозную систему к увеличению нагрузки на тормозящее колесо.

Заключение. В результате анализа неустановившихся процессов при торможении транспортного средства была разработана динамическая модель изменения положения кузова транспортного средства. На основании полученной системы уравнений ускорений линейных и угловых перемещений кузова был разработан метод определения нагрузки, приходящейся на каждое из колес транспортного средства. Используя этот принцип индивидуальной нагрузки на каждое колесо, была предложена перспективная адаптивная система торможения, основанную на изменении тормозного момента, при согласовании изменения нагрузки на тормозящее колесо.

Список литературы

1. Simulation and experimental design of load adaptive braking system on two wheeler / R. Kolla, V. Ganesh, R. Sakthivel [et al.] // Computer Systems Science and Engineering, 2023. vol. 45, no.3, P. 3115–3134. DOI:10.32604/csse.2023.033077.

2. Adaptive cruise control strategy design with optimized active Braking control algorithm / W. Wu, D. Zou, J. Ou [et al.] // Mathematical Problems in Engineering, vol. 2020, 10p., https://doi.org/10.1155/2020/8382734

3. Adcox J. Adaptive and robust braking-traction control systems // Dissertation PhD. 2014. 144p.

4. Туренко А.Н., Шуклинов С.Н. Адаптивная автоматизированная система управления торможением автомобиля с перенастраиваемой моделью // Вестник ХНАДУ. 2014. №67. С. 25-31.

5. Туренко А.Н., Шуклинов С.Н., Михалевич Н.Г. Моделирование динамики колесной машины с адаптивным электропневматическим приводом тормозов // Вестник ХНАДУ. 2012. №56. С. 66-74.

6. Research on adaptive distribution control strategy of braking force for pure electric vehicles / J. Liu, L. Bu, B. Fu [et al.] // Processes 2023, 17 p. DOI: 10.3390/pr11041152

7. Анализ неустановившихся процессов в автопоездах, движущихся по криволинейной траектории, в процессе торможения / И. А. Яицков, П. А. Поляков, Е. С. Федотов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 2. С. 497-516. DOI 10.24412/2071-6168-2023-2-497-517.

8. Поляков П.А. Влияние конструкции прижимающих механизмов тормоза дисково-колодочного типа на колебания, возникающее в контакте фрикционного узла // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 5. С. 408-420. DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-408-420.

9. James S., Anderson S., Da Lio M. Longitudinal vehicle dynamics: a comparison of physical and data-driven models under large-scale real-world driving conditions // IEEE Access. 2020. Vol.8. P. 73714 – 73729. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2988592

10. Поляков П.А. Определение положения центра давления в системе «прижимающий элемент – тормозная колодка – тормозной диск» // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 16. С. 62-69. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-16-62-69.

Яицков Иван Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, декан, yia@rgups.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Ростовский государственный университет путей сообщений,

Поляков Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент, polyakov.pavel88@mail.ru, Россия, Краснодар, Кубанский государственный технологический университет,

Шевцов Юрий Дмитриевич, сщтрудник, shud48@mail.ru, Россия, Краснодар, Кубанский государственный технологический университет,

Федотов Евгений Сергеевич, сотрудник, avtoru2009@mail.ru, Россия, Краснодар, Кубанский государственный технологический университет

PREREQUISITES FOR CREATING AN ADAPTIVE SYSTEM BRAKING OF CARS

I.A. Yaitskov, P.A. Polyakov, Yu.D. Shevtsov, E.S. Fedotov

The article analyzes the non-stationary processes of the vehicle body during deceleration and the prerequisites for creating an automated brake control system. As a result of modeling, the equations of linear and angular displacements of the vehicle body, as well as their accelerations when moving along a curved section, were obtained. The main input parameters were inertial, dissipative and stiffness coefficients of the body. Using a mathematical apparatus, angular movements of the pitch and roll of the vehicle body with a load on the right front wheel during braking were calculated. The principle of operation of the adaptive braking system is proposed on the example of a three- and six-piston caliper.

Key words: adaptive braking system, braking device, angular oscillation, angular acceleration, pitch, roll, wheel load.

Yaitskov Ivan Anatolyevich, doctor of technical sciences, professor, dean, yia@rgups.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State Transport University,

Polyakov Pavel Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, polyakov.pavel88@mail.ru, Russia, Krasnodar, Kuban State Technological University,

Shevtsov Yuri Dmitrievich, employee, shud48@mail.ru, Russia, Krasnodar, Kuban State Technological University,

Fedotov Evgeny Sergeevich, employee, avtoru2009@mail.ru, Russia, Krasnodar, Kuban State Technological University

УДК 621.865.8: 517.97: 51-74
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-593-594

СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРИНУЖДЕНИЯ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.М. Майстришин

Обращается внимание на возможность снижения энергетических затрат при достижении цели переносного движения объекта за счет отбора избыточной энергии в процессе разгона – торможения. Показано, что, при замене конструируемого управления (переносного ускорения) другим, эквивалентным по энергоемкости, возникает ряд аналитических трудностей поиска кинематических параметров движения. Варианты эквивалентной замены ускорения иллюстрируются на численных примерах, отражающих особенности и свойства данного типа оптимальных управлений.

Ключевые слова: переносное ускорение реверсионное конструирование, энергоемкость движения.

Теории оптимального управления движением объектов посвящены работы [1 – 5] и другие. Конструирование управлений переносным движением абсолютно твердых и деформируемых объектов отражено в ряде публикаций [6 – 8]. С ростом степени полинома ускорения переносного движения выявлена тенденция снижения энергии на реализацию оптимального управления типа «разгон-торможение». На примерах показано снижение энергетического принуждения для достижения цели движения; реализация найденного оптимального управления не исключает его замены некоторым эквивалентным управлением.

В [9, 10] освещены теоретические и экспериментальные подтверждения существования широкого класса оптимальных кососимметричных управлений, подтверждающих достижение поставленной цели движения с существенной экономией энергии. Возможна замена одного управления другим, облегчающим практическую реализацию движения при неизменной энергоемкости. Представляет интерес поиск и совершенствование алгоритмов таких эквивалентных преобразований.

Цель исследований – анализ особенностей реверсионно конструируемых оптимальных управлений, обеспечивающих снижение энергетических затрат на реализацию цели движения.

Основная часть. Кососимметричная функция управления (переносного ускорения) принята в виде:

$$U(t) = \frac{A\cos(pt)}{B + C\sin^3(pt)}, \tag{1}$$

где A, B, C = const.

При численных исходных данных (например, $A = 2$, $B = 2$, $C = 50$, $p = 1$) график функции (1) изображен на рис. 1.

Из графика качественно видно удаление некоторой «лишней» энергии на участках разгона и торможения в окрестности $t = T/2$, т.е.

$$U(T/2) = 0, \qquad \frac{dU}{dt}(T/2) = 0. \tag{2}$$

При численном определении площади $U(t)$ принято $T = \pi$ с:

$$\int_0^{T/2} U(t)dt = 0{,}39385.$$

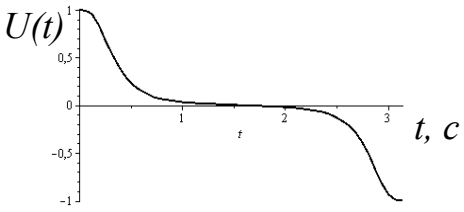


Рис. 1. График U(t)

Для сравнения рассмотрим полученное реверсионно (при степени полинома ускорения $n = 3$) кососимметричное управление [5]:

$$U_1(t) = \frac{10L(T-2t)^3}{T^5}, \tag{2}$$

где L – общее перемещение за время $t = T$.

При $L = 1$ м график функции (2) изображен на рис. 2.

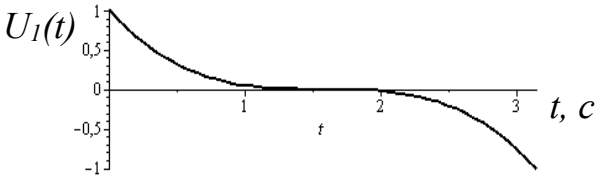


Рис. 2. График $U_1(t)$

В этом случае $\int_0^{T/2} U_1(t)dt = 0{,}3979.$

Затраченная на реализацию такого движения ($m = 1$ кг) энергия равна

$$A_1 = 2\int_0^{T/2} U_1(t)V_1(t)dt = 0{,}1583 \text{ Дж}.$$

Аналитические и численные трудности возникают при нахождении $V(t)$ и $S(t)$ в результате интегрирования функции (1).

При вычислении энергии в первом приближении воспользуемся зависимостью для скорости в случае конструирования:

$$V_1(t) = \frac{10t(\pi - t)(2t^2 - 2\pi t + \pi^2)}{\pi^5}.$$

Тогда $A = 2\int_0^{T/2} U(t)V_1(t)dt = 0{,}14214$ Дж.

В смысле энергоемкости приближенно уравнение (1) эквивалентно реверсионно полученному управлению при $n = 3$: $U_e(t) = \frac{10L(T-2t)^3}{T^5}$.

В этом случае при $L = 1$ м, $T = 1$ с графики $U_e(t)$, $V_e(t)$, $S_e(t)$ изображены на рис. 3.

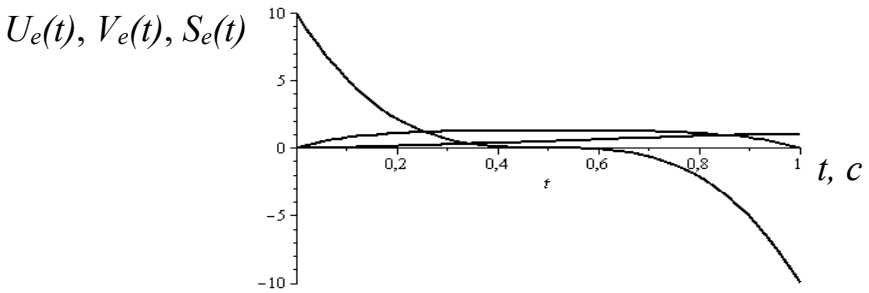


Рис. 3. Графики $U_e(t)$, $V_e(t)$, $S_e(t)$

Полная энергия $A = 2\int_0^{T/2} U_e(t)V_e(t)dt = 1{,}5625$ Дж. В случае классического управления (задача Лагранжа, $n = 1$) выражения для ускорения, скорости и перемещения известны

$$U_1(t)=\frac{6L(T-2t)}{T^3},\qquad V_1(t)=\frac{6Lt(T-t)}{T^3},\qquad S_1(t)=\frac{Lt^2(3T-2t)}{T^3}. \tag{4}$$

Полная энергия (L = 1 м, m = 1 кг, T= 1 с)

$$A_1=2\int_0^{T/2}U_1(t)V_1(t)dt=2{,}25\ \text{Дж}.$$

Очевидна экономия энергии при использовании реверсионного управления.

При конструировании управления (например, n = 3) принимался полином для переносного поступательного движения

$$S_e(t)=\sum_{i=1}^{5}C_i t^{i-1},\qquad V_e(t)=\frac{dS_e}{dt},\qquad U_e(t)=\frac{dV_e}{dt},$$

который удовлетворял условиям $S_e(0)=0,\ V_e(0)=0,$ т.е. движение начиналось из состояния покоя.

С учетом условий на правом конце $S_e(T)=L,\ V_e(T)=0$ и дополнительных $U_e(T/2)=0,\ \dfrac{dU_e}{dt}(T/2)=0,$ после определения коэффициентов C_1 – C_5 из системы линейных алгебраических уравнений и факторизации полиномов следовали аналитические зависимости:

$$U_e(t)=\frac{10L(T-2t)^3}{T^5},\qquad V_e(t)=\frac{10Lt(T-t)(2t^2-2Tt+T^2)}{T^5},$$
$$S_e(t)=\frac{Lt^2(5T^3-10T^2t+10Tt^2-4t^3)}{T^5}, \tag{5}$$

где параметры L и T задаются заранее.

Если непосредственно применить вариационный метод теории оптимального управления с использованием для рассматриваемого случая реверсионно восстановленного критерия оптимальности $J=\int_0^T\dot{U}^2dt,$ где $\dot{U}=\dfrac{dU}{dt},$ то при принятых ранее условиях получим, естественно, выражения (5). Однако, отказавшись от условий отбора избыточной энергии на разгон и торможение, и используя непосредственно минимизацию функционала (по методу Ритца) не получим экономии энергии на реализацию управления.

Пример. Для принятого ранее полинома после выражения коэффициентов C_1 и C_2 через C_3 и C_4 из условий $S_e(T)=L,\ V_e(T)=0,$ подстановки выражения $\dfrac{dU}{dt}$ в функционал $\int_0^T\dot{U}^2dt,$ вычисления производных $\dfrac{\partial J}{\partial C_3}=0,\ \dfrac{\partial J}{\partial C_4}=0$ получено:

$$S_e(t)=\frac{Lt^2(5T^3-5Tt^2+2t^3)}{T^5},\qquad V_e(t)=\frac{5Lt(T-t)(-t^2+Tt+T^2)}{T^5},$$
$$U_e(t)=\frac{2L(T-2t)(-2t^2+2Tt+T^2)}{T^5}.$$

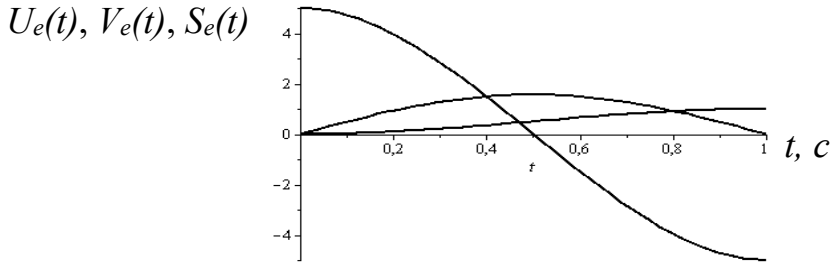


Рис. 4. Графики $U_e(t)$, $V_e(t)$, $S_e(t)$

Из графиков следует, что управление напоминает гармоническую функцию, но $A=2\int_0^{T/2}U_e(t)V_e(t)dt=2{,}4414\ \text{Дж},$ т.е. энергия не только не уменьшается, но и несколько возрастает.

Используя, например, критерий $\int_0^T U_e^2 dt,$ получим при данном полиноме $C_3 = C_4 = 0$, т.е., как и следовало ожидать, результат классического вариационного исчисления.

Если же использовать критерий $\int_0^T V_e^2 dt,$ то управление приобретает сложный для практической реализации характер.

Выводы.

1.Осуществлена попытка поиска новых эквивалентных по затратам энергии оптимальных управлений типа «разгон – торможение» переносным движением объектов в виде непрерывных аналитических функций.

2.Рассмотренный путь конструирования управлений сопряжен с выбором простых для практической реализации функций, что продолжает оставаться актуальной задачей дальнейших исследований.

Список литературы

1. Красовский Н.Н. Теория управления движением. М.: Наука, 1968. 476 с.
2. Маркеев А.П. О принципе наименьшего принуждения. Соросовский образовательный журнал. 1998. № 1. С. 113-121.
3. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. М.: Наука, 1987. 304 с.
4. Черноусько Ф.Л. Акуленко П.Д. Соколов Б.Н. Управление колебаниями. М.: Наука, 1980. 384 с.
5. Оптимальное управление движением / В.В. Александров, В.Г. Болтянский, С.С. Лемак, Н.А. Парусников, В.М. Тихомиров– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 376 с.
6. Бохонский А.И., Варминская Н.И., Мозолевская Т.В. Механика управляемого движения объектов. М.: ИНФРА-М, 2021.170 с.
7. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов. С.-Пб: НИЦ МС, 2020.120 с.
8. Бохонский А.И., Майстришин М.М. Снижение энергоемкости оптимального управления переносным движением упругих объектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 353 – 358.
9. Экспериментальная проверка оптимального управления переносным движением деформируемых объектов / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, Э.О. Балаканов, И.В. Гусаков // Оптимизация производственных процессов. Севастополь: СевНТУ, 2010. № 12.С. 66 –72.
10. Бохонский А.И., Майстришин М.М., Рыжков А.И. Экспериментальная проверка оптимального вращения упругого стержня // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. Севастополь: Изд-во СГУ, 2020. № 2 (10). С. 3 – 16.

Бохонский Александр Иванович, д-р техн. наук, профессор, bohon.alex@mail.ru*, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,*

Варминская Наталья Ивановна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, nvarminska@gmail.com, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова,

Майстришин Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доцент, mihail.maystrishin@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

REDUCING ENERGY CONSUMPTION TO ACHIEVE THE PURPOSE OF OPTIMAL MOVEMENT

A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, M.M. Maystrishin

Attention is drawn to the possibility of reducing energy costs when achieving the goal of portable movement of an object due to the selection of excess energy in the process of acceleration and braking is addressed. It is shown that when replacing a reversibly designed control (translational acceleration) with an equivalent one in terms of energy intensity, a number of analytical difficulties arise, associated, for example, with the search for kinematic parameters of motion. Options for equivalent change of acceleration are illustrated with numerical examples reflecting the features and properties of this type of optimal control.

Key words: translational acceleration, reversible design of controls, energy intensity of movement.

Bokhonsky Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, bohon.alex@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University,

Varminskaya Natalia Ivanovna, candidate of technical science, head of the department, nvarminska@gmail.com, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov,

Maystrishin Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, docent, mihail.maystrishin@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University.

УДК 621.86
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-597-598

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОСТОЯНСТВА СКОРОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВЫЛЕТА СТРЕЛЫ КРАНА СТРЕЛОВОГО ТИПА

П.В. Витчук, Н.Г. Сысенко, Н.А. Витчук, В.Ю. Анцев, А.Н. Шафорост, А.Д. Горынин

Проектирование стреловых систем грузоподъемных кранов стрелового типа ведут из условия минимизации отклонения траектории груза по вертикали от горизонтальной прямой на всем диапазоне изменения вылета стрелы. При этом вопросам горизонтальных колебаний груза уделяют недостаточное внимание, хотя они также, как и вертикальные, оказывают влияние на динамику работы крана и, как следствие, на его циклическую прочность. В данной статье представлены уравнения, описывающие горизонтальное перемещение груза. Представленные уравнения использованы для описания горизонтального перемещения с использованием среды Mathcad на примере стрелового устройства крана-деррика ДК-45/60. Доказано, что применение двигателя с частотным регулированием, настроенным в соответствии с основными параметрами стреловой системы, позволяет добиться постоянного значения скорости горизонтального перемещения груза.

Ключевые слова: скорость, стрела, уравнительный полиспаст, траектория передвижения груза, проектирование.

При проектировании стреловых систем грузоподъемных кранов стрелового типа приоритетным является вопрос разработки такого сочетания параметров стреловой системы, при которой отклонение траектории перемещения груза по вертикали от горизонтальной линии Δy, соответствующей высоте подъема груза, на всем диапазоне изменения вылета стрелы было бы минимальным $\Delta y \to \min$ [1–5]. С этой целью используют различные методики оптимального проектирования стреловых систем, например, представленные в [6–10]. При этом вопросам горизонтальных колебаний груза уделяют недостаточное внимание, хотя они также, как и вертикальные, оказывают влияние на динамику работы крана и, как следствие, на его циклическую прочность. И если достичь полностью горизонтальной траектории перемещения груза на практике пока не представляется возможным, то достичь относительного постоянства скорости горизонтального перемещения скорости груза вполне возможно.

Рассмотрим процесс горизонтального перемещения груза при изменении вылета стрелы.

С целью упрощения расчета используем допущение о том, что при проектировании стреловой системы был получено такое сочетание параметров стреловой системы, при котором обеспечивается траектория перемещения груза, близкая к горизонтальной линии, то есть можно принять $\Delta y \approx 0$ **и** $y \approx const$. Тогда изменением величины потенциальной энергии груза при изменении вылета стрелы можно пренебречь. То есть в случае полного уравновешивания веса стрелового устройства мощность двигателя механизма изменения вылета стрелы затрачивается только на преодоление различных сил трения и сопротивления (рис. 1).

Считая систему условно замкнутой, получим:

$$E_{\text{К1}} = E_{\text{К2}} = \frac{mV_1^2}{2} = \frac{mV_2^2}{2} = E = \text{const}\,;\; V_1 = V_2 = \text{const}\,, \tag{1}$$

где $E_{\text{К1}}, E_{\text{К2}},$ и V_1, V_2 – соответственно кинетическая энергия и скорость горизонтального перемещения груза для некоторых произвольных положений стрелы 1 и 2 (рис. 1); E – полная механическая энергия системы; m – масса груза.

Выражение (1) не выполняется на практике, поскольку скорость перемещения груза связана со скоростью подъёма стрелы с учетом параметров стрелового $u_{\text{п}}$ и уравнительного z полиспастов.

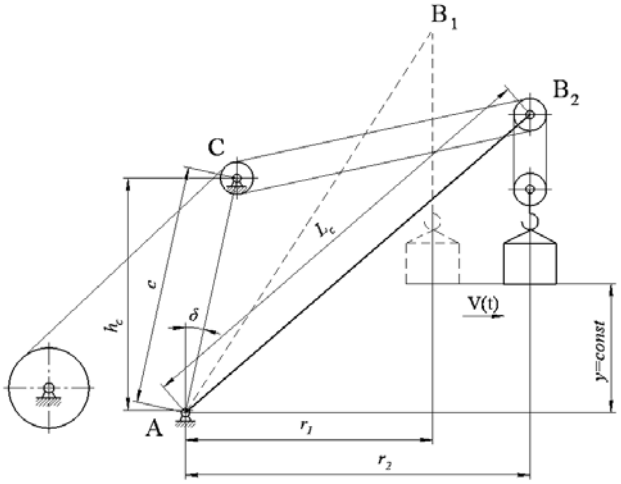


Рис. 1. Перемещение груза краном стрелового типа при допущении о горизонтальности траектории: L_{c} – длина стрелы; A – ось поворота стрелы; C и B – блоки уравнительного полиспаста; $h_c, c, \delta, y, r_1, r_2$ – прочие геометрические параметры

Рассмотрим перемещение груза по горизонтали на примере крана-деррика ДК-45/60. Основные параметры крана [11]: тип – четырёхопорный кран с двумя подкосами; грузоподъёмность $Q = 60$ т, длина стрелы $L_c = 32$ м, высота мачты $h = 14{,}71$ м, кратность грузового полиспаста $i = 8$, кратность стрелового полиспаста $u_п = 20$.

Скорость горизонтального перемещения груза будем определять в среде Mathcad на основе использования ранее разработанного алгоритма, описанного в работе [10], с рядом дополнений.

Диапазон изменения вылета стрелы крана-деррика ДК-45/60 в соответствии с паспортными данными составляет $r = 7{,}2 \ldots 32{,}4$ м.

Представим выражения, приведенные в [10], в виде функциональной зависимости от вылета стрелы r и времени t.

Закон изменения длины полиспаста от вылета стрелы r:

$$BC(r) = \sqrt{L_c^2 + h_c^2 - 2L_c h_c \sqrt{1 - \left(\frac{r}{L_c}\right)^2}}\,. \tag{2}$$

Закон изменения вылета стрелы от времени t:

$$r(t) = L_c(t)\sqrt{1 - \left(\frac{L_c^2(t) + h_c^2(t) - BC^2(t)}{2L_c(t)h_c(t)}\right)^2}\,. \tag{3}$$

Длина полиспаста *BC* на всем диапазоне изменения вылета стрелы изменяется с постоянной скоростью V_c – скоростью подъема (опускания) стрелы, м/мин (рис. 2).

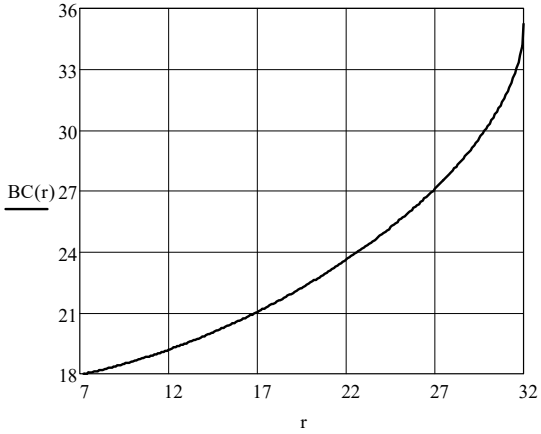


Рис. 2. Зависимость длины полиспаста BC от вылета стрелы при использовании общепромышленного электродвигателя с постоянным значением частоты вращения

На данном этапе предположим, что механизм изменения вылета стрелы содержит общепромышленный электродвигатель с постоянным значением частоты вращения.

Для этого случая получим скорость горизонтального перемещения груза $V(t) = \frac{d}{dt} r(t)$ (рис. 3).

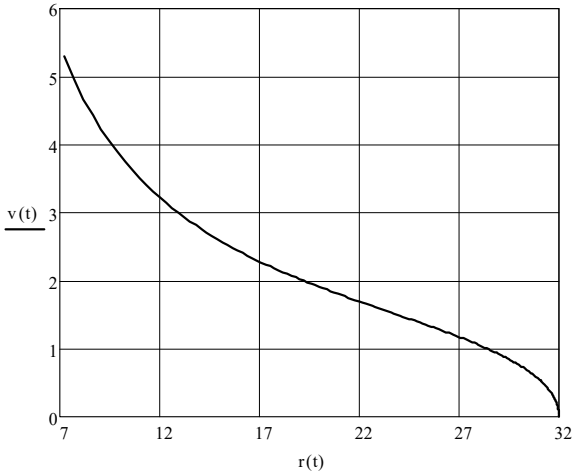


Рис. 3. Зависимость скорости горизонтального перемещения груза от вылета стрелы при использовании общепромышленного электродвигателя с постоянным значением частоты вращения

Как следует из рис. 3, при использовании в механизме изменения вылета стрелы общепромышленного электродвигателя с постоянным значением частоты вращения скорость горизонтального перемещения груза при изменении вылета стрелы изменяется в значительном диапазоне от 0 до 5,25 м/мин.

Теперь предположим, что механизм изменения вылета стрелы содержит двигатель с частотным регулированием и выполним аналогичные вычисления по формулам (2) и (3), задавшись интервалом времени в секундах $t = 0,1...40$ (рис. 4).

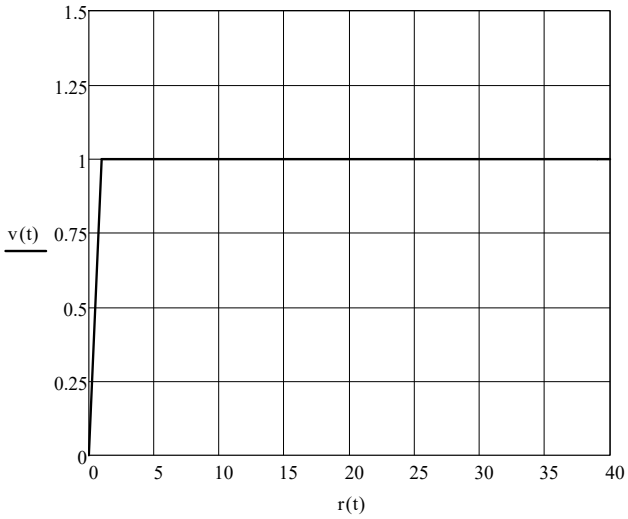


Рис. 4. Зависимость скорости горизонтального перемещения груза от вылета стрелы при использовании двигателя с частотным регулированием

Шаг изменения вылета стрелы был принят равным 1 м. В диапазоне вылета от 0 до 1 м (рис. 4) присутствует резкое возрастание скорости от 0 до заданного значения за шаг. Это было сделано специально, чтобы показать, что процесс изменения скорости не является мгновенным, хотя и относительно быстрым.

Зависимость линейной скорости набегания каната на барабан от вылета стрелы при заданных параметрах механизма подъёма стрелы представлена на рис. 5.

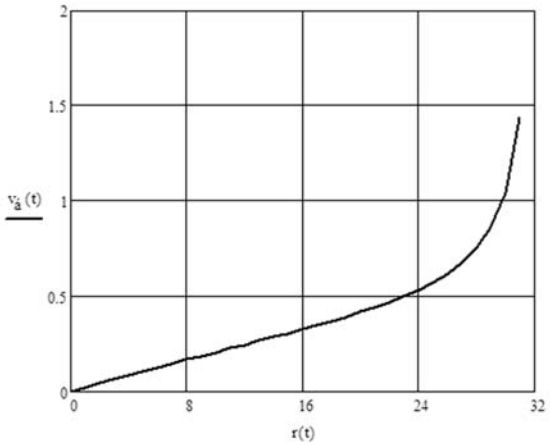


Рис. 5. Зависимость линейной скорости набегания каната на грузовой барабан от вылета стрелы при использовании двигателя с частотным регулированием

Таким образом можно сделать вывод, что применение двигателя с частотным регулированием, настроенным в соответствии с основными параметрами стреловой системы крана, позволяет получить постоянное значение скорости горизонтального перемещения груза.

Список литературы

1. Александров М.П. Грузоподъемные машины. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – Высшая школа, 2000. 552с.

2. Дукельский А.И. Портовые грузоподъемные машины. М.: Транспорт, 1970. 439 с.

3. Ланг А.Г., Мазовер И.С., Майзель В.С. Портальные краны. М.: Машгиз, 1962. 284 с.

4. Портальные краны / А.Н. Орлов [и др.] / Под ред. М.Н. Хальфина Новороссийск: Юж.-Рус. гос. техн. ун-т., 2001. 318 с.

5. Петухов П.З., Ксюнин Г.П., Серлин Л.Г. Специальные краны. М.: Машиностроение, 1985. 248 с.

6. Кобзев А.П., Кобзев Р.А. Специальные краны. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 472 с.

7. Стрелов В.И. Расчет шарнирных стреловых систем портальных кранов (аналитический метод кинематического синтеза). Калуга: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 188с.

8. Михеев В.А., Миненков Б.Е. Метод синтеза однозвенного стрелового устройства портального крана с уравнительным полиспастом // Вісник приазовського державного технічного університету, 2002. № 12. С. 1-3.

9. Витчук П.В., Гнатюк П.Р., Витчук Н.А., Шадский Г.В. Модернизация стрелового устройства кранадеррика КД 30/50 // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2021. №. 3. С. 152-156.

10. Витчук П.В., Сорокина И.И., Витчук Н.А., Гнатюк П.Р., Сысенко Н.Г., Шадский В.Г. Методика оптимального проектирования прямых уравновешенных стрел с уравнительными полиспастами с разнесенными блоками // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2021. №. 4. С. 83-90.

11. Витчук П.В., Сысенко Н.Г., Витчук Н.А., Анцев В.Ю. Модернизация канатно-блочной системы деррик-крана ДК-45/60 // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, 2022. № 1. С. 210-222.

Витчук Павел Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Vitchuk@bmstu.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,

Сысенко Никита Григорьевич, инженер, nikita.sisenko@gmail.com, Россия, Калуга, АО «Калугапутьмаш»,

Витчук Наталья Андреевна, канд. техн. наук, доцент, Vitchuk.Natalya@mail.ru, Россия, Калуга, Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,

Анцев Виталий Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, и. о. зав. кафедрой, anzev@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Шафорост Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент, akar06@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Горынин Алексей Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент, lexuss-22@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ENSURING THE CONSTANCY OF THE SPEED OF HORIZONTAL MOVEMENT OF THE LOAD WHEN CHANGING THE BOOM OF THE BOOM TYPE CRANE

P.V. Vitchuk, N.G. Sisenko, N.A. Vitchuk, V.Yu. Antsev, A.N. Shaforost, A.D. Gorynin

Condition of minimizing the deviation of the vertical trajectory of the cargo from the horizontal line over the entire range of the boom departure carried base the design of boom systems of boom type cranes out. At the same time, insufficient attention is paid to the issues of horizontal vibrations of the load, although they also, like vertical ones, affect the dynamics of the crane and, as a consequence, its cyclic strength. This article presents the equations describing the horizontal movement of the load. Describe horizontal displacement using the Mathcad environment on the example of the boom device of the crane-derrick DC-45/60 used the equations presented. It has been proved that the use of an engine with frequency control, configured in accordance with the basic parameters of the boom system, allows you to achieve a constant value of the speed of horizontal movement of the load.

Key words: speed, boom, equalizing polispast, horizontal movement of the load, designing.

Vitchuk Pavel Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, Vitchuk@bmstu.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University Kaluga,

Sisenko Nikita Grigorevich, engineer, nikita.sisenko@gmail.com, Russia, Kaluga, JST «Kalugaputmash»,

Vitchuk Natalia Andreevna, candidate of technical science, docent, vitchuk.natalya@mail.ru, Russia, Kaluga, Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky,

Antsev Vitaliy Yurievich, doctor of technical science, professor, manager of department, anzev@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Shaforost Alexandr Nikolaevich, candidate of technical science, docent, akar06@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Gorynin Alexey Dmitrievich, candidate of technical science, docent, lexuss-22@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.08
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-601-602

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШЕСТИЗВЕННОГО МЕХАНИЗМА ПУТЕМ ОБЪЕДИНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ, СФЕРИЧЕСКОЙ И ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДНОЙ СТРУКТУРЫ

И.А. Романов, М.Р. Фаизов, Ф.Ф. Хабибуллин

Шестизвенный шарнирный механизм, полученный из сферического четырехзвенного механизма и механизма Беннета из четырех звеньев. Производиться подбор оптимальных размеров звеньев. Одно звено является исследуемым, под которое подбираются все параметры. Звено является место неподвижного положения. Учитывается вращение вокруг данного звена при реализации шарнирного механизма. Проектируется структурная схема для наглядного представления самого механизма. При исследовании учитывается пространственное перемещение всех звеньев, кроме самого исследуемого звена. На основе подбора происходит выявление оптимального размера длины звена, его угла наклона, углов наклона шарниров и теоретическое расположение высоты шарниров. Для более точного проектирования и реализации механизма используется несколько переменных для определения лучшего диапазона работоспособности данного механизма.

Ключевые слова: шарнирный механизм, беннетт, сферический механизм, высота шарниров, пространственное смещение, виртуальный шарнир.

Введение

Для реализации пространственного механизма нужно учитывать геометрическое пространство вращения и его геометрические параметры звеньев. В нашем случае реализовываем шестизвенный механизм с двумя кривошипными звеньями совершающие полное оборотное движение вокруг шарниров стойки. При реализации данного механизма следует учесть результаты новых пяти параметров совместного взаимодействия пространства и параметров звеньев.

На рисунке 1 представлена схема шестизвенного механизма ABCDEF, полученного объединением сферического четырехзвенного ABCK и механизма Беннета KDEF.

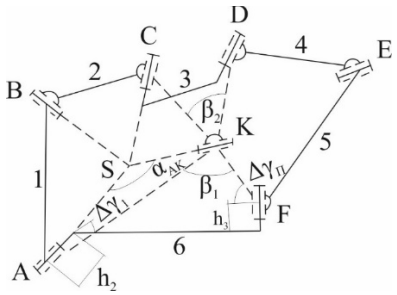


Рис. 1. Шестизвенный механизм

В этом шестизвенном механизме параметры сферических звеньев 1 и 2 могут быть заданы свободно, а звеньев 4 и 5 связаны геометрической зависимостью формулой 1.

$$l_4 / \sin \alpha_4 = l_5 / \sin \alpha_5 \quad (1)$$

Параметры же комбинированного звена 6 и того же и звена 3 одинаковые, а значит значение и параметры будут равны между собой:

$$l_6 / \sin \alpha_6 = l_3 / \sin \alpha_3 \quad (2)$$

Для определения угла наклона шарниров звена 6 используется формула 3:

$$\alpha_6 = \arccos(\cos\alpha_{AK}\cos\alpha_4 - \sin\alpha_{AK} \sin \alpha_4 \sin\beta_1) \quad (3)$$

В данной формуле следует учесть вращения пространственного шарнира с осью пересечения звеньев сферического механизма, от их возможности полного вращения зависит вращение ведущих кривошипов. Следовательно, в формуле 3 учитываем вращения угла α_{AK} и β_1в 360 градусов. При исследовании результат представленный на рисунке 2 угол β_1 берется определенным значением, и результат находиться в зависимости от угла α_{AK} в полный вращательный оборот в 360 градусов. По результату исследования по рисунку видно, что максимальное значение угла звена 6 достигается в 180 градусах, это и является оптимальным значением угла звена 6.

Рис. 2. Угол между шарнирами звена 6

На рис. 3 представлено пространственное определение угла наклона звена 6, а именно стойки. В данном случае учитывается вращение полных оборотов пространственных виртуальных шарниров при совместном движении. Как видно по рисунку максимальное значение подобно рисунку 2, но видно полное перемещение без разрывов.

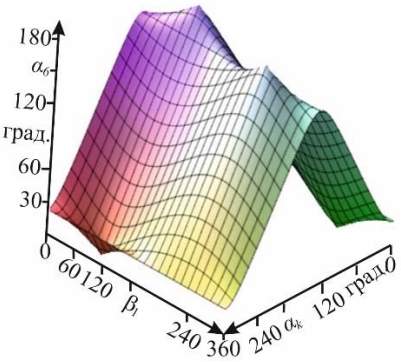


Рис. 3. Угол между шарнирами звена 6, пространственный вид

Размер длины между шарнирами звена 6 определяется зависимостью данных заданных в формулу 4:

$$l_6 = \frac{\sin\alpha_6}{A}[l_k \sin\alpha_4 \cos\alpha_{AK} \cos\beta_1 - l_4(\sin\alpha_4 \cos\alpha_{AK} + \sin\alpha_{AK} \cos\alpha_4 \sin\beta_1) \quad (4)$$

где

$$A = (\sin\alpha_4 \cos\alpha_{AK} + \sin\alpha_{AK} \cos\alpha_4 \sin\beta_1)^2 + \sin^2\alpha_{AK} \cos\alpha_{AK} \cos^2\beta_1$$

В данном случае соотношение размера длины звена 6 определяется через виртуальное рассстояние шарнира KL к углу α_{AK}, где результат представлен на рисунке 4.

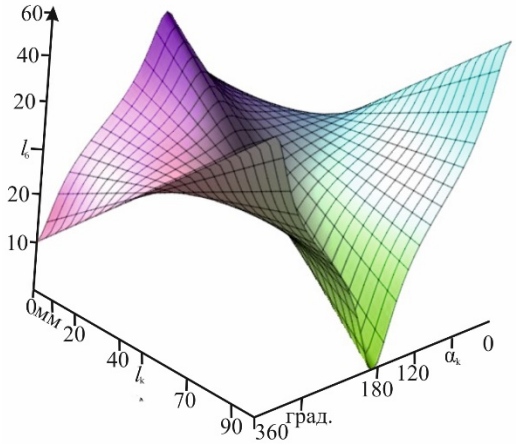


Рис. 4. Размер длины звена стойки

По результату графика 4 следует учитывать полный оборот и максимальная длина звена l*k,* что указывает на длину звена 6 стойки равной 60 мм.

По формуле 5 находиться высота правого шарнира А звена 6:

$$h_2 = \frac{1}{A}[l_4 \sin\alpha_4 \cos\beta_1 - l_k(\sin\alpha_{AK} + \sin\alpha_4 \sin\beta_1 \cos\alpha_{AK})] \quad (5)$$

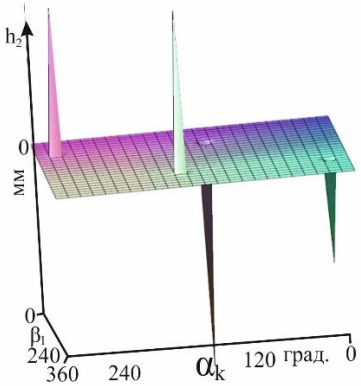


Рис. 5. Высота шарнира А звена 6 (стойки)

По результату исследования видно, что данное значение обязательно должно равняться нулю.

С помощью формулы 6 находиться высота левого шарнира F звена 6:

$$h_3 = \frac{1}{A}[l_k \cos\alpha_{AK}(\sin\alpha_{AK}\cos\alpha_4 + \sin\alpha_4\cos\alpha_{AK}\sin\beta_1) - l_4\sin\alpha_{AK} + \cos\beta_1\cos\alpha_6)] \quad (6)$$

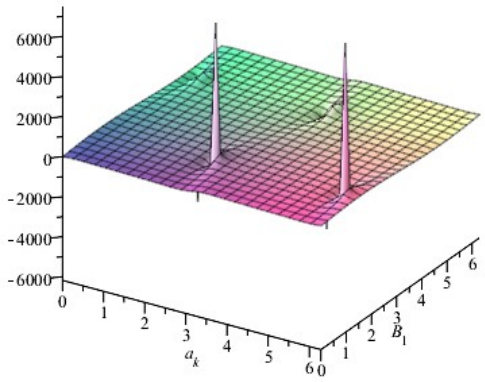


Рис. 6. Высота шарнира F звена 6 (стойки)

По результату исследования видно, что данное значение обязательно также равняться нулю.

Угол $\Delta\gamma_1$ определяет наклон правого шарнира звена 6 по формуле 7:

$$\Delta\gamma_1 = \arccos(-\sin\alpha_4\cos\alpha_{AK}\frac{\cos\beta_1}{\sin\alpha_6}) \quad (7)$$

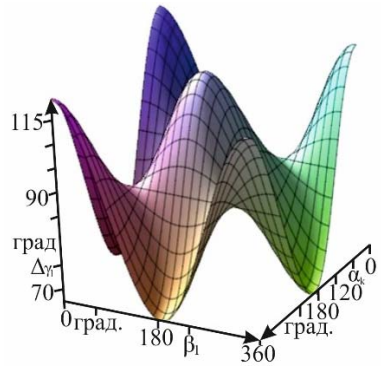


Рис. 7. Угол наклона шарнира А звена 6

На рисунке 7 учитываем максимальный оборот вращения обоих параметров. Максимальный угол наклона правого шарнира составляет 120 градусов.

Угол $\Delta\gamma_2$ определяет наклон левого шарнира звена 6 по формуле 7:

$$\Delta\gamma_2 = \arccos[-\frac{1}{\sin\alpha_6}(\cos\alpha_{AK}\sin\alpha_4 + \cos\alpha_4\sin\alpha_{AK}\sin\beta_1)] \quad (8)$$

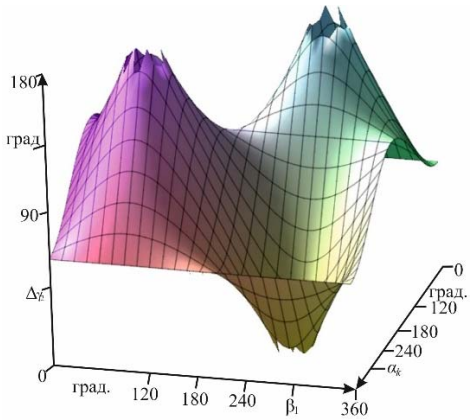


Рис 8 угол наклона шарнира F звена 6

По рисунку 8 видно, что также, как и на 7 рисунке что наклон левого шарнира составляет 65 градусов.

В приведенных выражениях в дополнение к принятым ранее обозначениям приведены α_{AK} – угол между осями шарниров А и К сферического четырехзвенного механизма с вращательными парами, l_k – длина отрезка АК, перпендикулярного оси SK.

В общем случае оси шарниров A и F звена 6, а также оси шарниров C и D звена 3 перекрещиваются, в частном же случае могут быть параллельными или пересекаться.

Характер движения звеньев 1 и 5, связанных со станиной 6, зависит от вида сферического шарнирного механизма из четырех звеньев ABCK. Как и в рассмотренном выше шестизвенном механизме на рисунке 1, звенья 1 и 5 могут быть либо кривошипами, либо звено 1 балансиром, а звено 5 кривошипом и наоборот.

Заключение. Исследовано математическая модель геометрии и пространственных параметров шестизвенного механизма путем объединения сферической и параллелепипед структуры. Исследование механизма подводиться через звено, которое является стойкой. При получении звена учитывается полный оборот вращения пространства. По полученным данным находиться оптимальная длина звена, угол наклона звена, теоретическая высота шарниров, и их углов наклона в пространстве.

Список литературы

1. Кесель Л. Г. Влияние деформации плоского зеркала коаксиального лазера на характеристики выходного излучения // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 15–20.

2. Батищева К. А., Вымпина Ю. Н. Влияние способа обработки алюминиево-магниевого сплава на структуру кольцевых осадков, формирующихся при испарении капель коллоидных растворов // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 31–33.

3. Ефремова Е. С., Мифтахов Б. И., Солдаткина К. В. Имитационное моделирование неподвижного приемника вихревой системы воздушных сигналов // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева 2021. Т. 77, № 1. С. 102–108.

4. Иванов В. К. К задаче аналитического проектирования мехатронных систем // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева 2021. Т. 77, № 1. С. 67–70.

5. Валиуллина Д. М., Козлов В. К., Садыков Э. М. Исследование корреляций между характеристиками трансформаторного масла // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 62–66.

6. Кесель Б. А., Кесель Л. Г. Энергоэффективность мобильной газотурбинной электростанции малой мощности для электроснабжения буровой // Вестник казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 71–75.

7. Муратаев Ф. И., Евлампьев А. В., Муратаев Т. А. Анализ причин развития стресс коррозии аустенитных сталей и сварных соединений // Вестник казанского технического университета им. А. Н. Туполева.
2021. Т. 77, № 1. С. 76–81.

8. Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овально-траншейными вихрегенераторами / А. А. Миронов, С. А. Исаев, А. Н. Скрыпник, И. А. Попов, Ю. Ф. Гортышев // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12, № 9. С. 386–402.

9. Фаизов М. Р., Мудров А. П. Исследование движения сферического тренажера // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 1. С. 182–191.

10. Skrypnik A.N., Shcelchkov A.V., Gortyshov Yu.F., Popov I.A. Artifician neural networks application on friction factor and heat transfer coefficients prediction in tubes with inner helical-finning. Applied Thermal Engineering, 2022, vol. 206, p. 118049.

11. Рощин В. В., Хабибуллин Ф. Ф., Ерахмадов С. Н. К оценке температурного состояния шарикоподшипников опор гтд повышенной теплонапряженности // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2019. Т. 75, № 3. С. 66–69.

12. Моделирование динамики двухфазного потока в сепараторе / И. М. Баянов, Ю. Ф. Гортышов, В. Г. Тонконог, М. И. Тонконог // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2013. № 4. С. 34–42.

13. Lustin A.D., Egorov S.V. Defining relation of vibration of vehicle suspension with the mass and rigidity design deviations. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 44629- 44635.

14. Конструктивное моделирование процессов синтеза: монография В. А. Райхлин, И. С. Вершинин, Р. К. Классен, Р. Ф. Гибадуллин, С. В. Пыстогов. Казань: Фэн, 2020. 248 с.

15. Вершинин И. С. Конструктивное моделирование систем ассоциативной стеганографии // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 12-3. С. 137–144.

16. Snegurenko A.P., Zaydullin S.S., Novikova S.V., Valitova N.L., Kremleva E.S. Technology of multilevel interuniversity indicators as a factor for increasing academic mobility. Experience based on russian federal educational standards. Integration of Education, 2022, vol. 26, no. 1 (106). P. 55-71.

17. Ассоциативная стеганография текстовых сообщений / И. С. Вешинин, Р. Ф. Гибадуллин, С. В. Пыстогов, В. А. Райхлин // Вестник московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2021. № 1. С. 3–14.

18. Gibadullin R.F., Vershinin I.S., Volkova M.M. Software Development for Placing Tiles in TwoDimensional Space. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies - 2020 (FarEastCon 2020). P. 9271369.

19. Pikuleva N.I. Querying big graphs in data flow language / N. I. Pikuleva, A. S. Khafizova, D. A. Gashigullin // Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. Sochi, 2021. P. 455-460. DOI 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446339. EDN YVZNIN.

20. Разработка сервиса для генерации словоформ в корпусной лингвистике / М. Р. Сибгатуллин, Р. Ш. Минязев, И. И. Сафиулин [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6(90). С. 77-87. EDN XOQRRJ.

Романов Илья Александрович, инженер, Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,

Фаизов Марат Рауфович, аспирант, faizovmarat92@gmail.com, Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,

Хабибуллин Фаниль Фаргатович, канд. техн. наук, доцент, fanil_arsk@mail.ru, Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

STUDY OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF A SIX-BANK MECHANISM BY COMBINING SPATIAL MECHANISMS, SPHERICAL AND PARALLELEPIPEDAL STRUCTURE

I.A. Romanov, M.R. Faizov, F.F. Khabibullin

A six-bar hinge mechanism derived from a spherical four-bar mechanism and a four-bar Bennett mechanism. The selection of optimal link sizes carried out. One link is the one under study, for which all parameters selected. The link is a place of fixed position. Rotation around this link taken into account when implementing the hinge mechanism. A block diagram being design visually represent the mechanism itself. The study takes into account the spatial movement of all links except the link under study. Based on the selection, the optimal size of the link length, its angle of inclination, the angles of inclination of the hinges and the theoretical location of the height of the hinges identified. To more accurately design and implement a mechanism, several variables used to determine the best operating range for a given mechanism.

Key words: hinge mechanism, Bennett, spherical mechanism, hinge height, spatial displacement, virtual hinge.

Romanov Ilya Aleksandrovich, student, Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI,

Faizov Marat Raufovich, master's, assistant, faizovmarat92@gamil.com, Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI,

Khabibullin Fanil Fargatovich, candidate of technical sciences, docent, fanil_arsk@mail.ru , Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI

УДК 629.048.7
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-605-606

ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ В ЭЛЕКТРОБУСАХ

Н.В. Савенков, Е.А. Покинтелица, А.М. Моржухин

В данной работе рассмотрены сопутствующие проблемы эксплуатации электробусов на городских маршрутах в отношении поддержания требуемой температуры пассажирского салона и рабочего места водителя, взаимосвязь этого процесса с запасом хода при применении различных систем терморегуляции. В качестве альтернативы предложены системы на основе теплоаккумулирующих материалов, функционирующих на основе фазовых переходов первого рода. Проведен критический анализ, сформулированы направления по дальнейшему развитию системы.

Ключевые слова: электробус, система терморегуляции, обогрев, высоковольтные батареи, тяговый электропривод, энергетическая эффективность, теплоаккумулирующие материалы.

Актуальность использования систем терморегуляции в электробусах заключается в нескольких аспектах:

– во-первых, необходимо увеличение энергоэффективности. Терморегуляция позволяет поддерживать оптимальную температуру внутри салона и батарейного отсека электробуса. Это помогает снизить потребление электрической энергии на отопление и охлаждение, что в свою очередь увеличивает дальность поездок и экономит заряд высоковольтных батарей (ВВБ);

– во-вторых, важно уделять внимание комфорту пассажиров, т.к. использование системы терморегуляции обеспечивает оптимальные микроклиматические условия в салоне электробуса как в летний, так и зимний периоды, что повышает качество общественного транспорта;

– в-третьих, необходимость повышения надежности и долговечности ВВБ, т.к. высокие или низкие температуры могут негативно сказаться на ресурсе ВВБ электробуса. Системы терморегуляции позволяют поддерживать ВВБ в оптимальных условиях, предотвращая их перегрев или переохлаждение;

– в-четвертых, электробусы, оснащенные системами терморегуляции, могут работать эффективно в любых климатических условиях наравне с традиционными автобусами;

– в-пятых, одно из главных достоинств использования электробусов – уменьшение негативного воздействия на окружающую среду. Электробусы сами по себе являются экологически чистым видом транспорта, но использование систем терморегуляции, рабочий процесс которых не предусматривает использование энергии сгорания углеводородного топлива, помогает дополнительно снизить негативное воздействие на окружающую среду. Благодаря энергоэффективности и рациональной работе ВВБ, ресурсов требуется меньше, что увеличивает экологическую эффективность электробусов.

В целом, использование систем терморегуляции в электробусах важно для увеличения их энергоэффективности, комфорта пассажиров, надежности ВВБ и уменьшения негативного воздействия на окружающую среду. Это делает данный вид транспорта более конкурентоспособным и привлекательным по сравнению с традиционными автобусами.

При разработке перспективных конструкций электробусов, необходимо принимать во внимание основные требования, предъявляемые ГУП «Мосгортранс» [1]:

1. Общая пассажировместимость – 85 чел.;

2. Низкий пол. Электробусы должны быть спроектированы с учетом основных параметров транспортной инклюзивности: низкие полы без перепадов высоты и широкие входные пространства позволяют людям с ограниченными возможностями пользоваться общественным транспортом без затруднений;

3. Минимальный пробег без подзарядки 40 км (при 100% нагрузке с включенным отоплением или климат-контролем);

4. Удельный расход электроэнергии не более 1,3 кВт·ч/км;

5. Срок службы каркаса кузова (стойкость к усталостным повреждениям, приводящим к аварийным ситуациям или отказам);

6. Продолжительность цикла зарядки блоков топливных агрегатов (БТА) при быстрой зарядке на маршруте: на 100% / 50% / 10% за 18 / 9 / 2 мин при ночной зарядке током 100 А - на 100% / 50% за 90 / 45 мин.;

7. Минимальное время оперирования в сутки – до 20 часов;

8. Бортовые источники электроэнергии – не менее 15 лет (контракт жизненного цикла) (срок службы/ответственности производителя высоковольтных цепей, тяговых аккумуляторных кислотных батарей (АКБ);

9. Автономный дизельный отопитель:

– температура включения +5° С,

– время прогрева салона до нормативных значений 15 минут;

10. Двухзонный климат-контроль для кабины водителя и пассажирского салона;

11. Совместно с электробусами производится поставка ультрабыстрых зарядных станций (внешнее питание от напряжения постоянного тока 600 В, максимальная величина тока на входе не выше 500 А, максимальное напряжение на выходе не более 600 В, максимальный ток на выходе не выше 500 А;

12. Контракт жизненного цикла – 15 лет, производство в РФ.

Некоторые характеристики электробусов российского производства и Республики Беларусь представлены в виде сравнительной таблицы 1.

Таблица 1

Основные параметры и показатели объектов исследования, имеющие прямое отношение к предмету выполняемого исследования [2-7]

Показатель	Марка электробуса												
	КАМАЗ-6282	KAMAZ 6292	KAMAZ 62825	KAMAZ 1221	ЛиАЗ-6274	НефАЗ-52992	Тролза-5265.02	GAZelle e-NN	БКМ Е321 Olgerd	БКМ Е433 Vitovt Max Electro	МАЗ-303Е	MAN Lion's City 12 E	Volgabus-5270.E0
Запас автономного хода, км	90	90	20	140	85	100	15	120	140	120	до 300	200-270	200-220
Пассажировместимость, чел.	85	135	85	12	85	85	100	22	88	153	72	92	90
Мощность силовой установки, кВт	125	240	180	87	2x125	2x115	180	100	-	160	175	160	120
Тип тяговой АКБ	литий-никель-марганец-кобальт (NMC)				литий-титанат (LTO)	литий-железо-фосфат (LFP)	LTO	NMC	LTO		LFP	NMC	LFP
Ёмкость тяговой АКБ, кВт·ч	201	345	95	35,5	77	313,6	85	48,4	167	183	412	480	352,6

Стоит отметить, что требования № 3, 4, 6, 7 определяют необходимые характеристики тягового электропривода и системы терморегуляции перспективных конструкций электробусов в случае, если они имеют один источник энергии – ВВБ.

Таким образом, тип и характеристики системы терморегуляции в значительной степени определяют перечисленные эксплуатационные свойства электробуса.

Терморегуляция пассажирского салона относится к процессу поддержания комфортной температуры в салоне для пассажиров. В случае электробусов, система терморегуляции обычно основывается на электрическом обогреве или кондиционировании воздуха.

Одна из основных проблем при эксплуатации электробусов – отсутствие «дарового» источника тепла для обогрева пассажирского салона и рабочего места водителя, по сравнению с автобусами, оснащенными двигателем внутреннего сгорания, в котором необходимое тепло принципиально возможно отбирать от жидкостной системы охлаждения силовой установки либо от системы отвода отработавших газов.

Рассмотрим структуру системы терморегуляции кабины водителя и пассажирского салона электробуса (табл. 2).

Одним из распространенных способов терморегуляции в электробусах является использование теплового насоса (столбец 1, табл. 2). Эта система включает в себя компоненты, такие как компрессор, конденсатор, испаритель и расширительный клапан. Компрессор сжимает и охлаждает хладагент, который затем циркулирует через кон-

денсатор, где он отдаёт тепло в окружающую среду. Затем охлажденный хладагент проходит через испаритель, который охлаждает пассажирский салон при обращении газа в жидкость. Расширительный клапан контролирует скорость потока хладагента, что позволяет более точно регулировать температуру в салоне. Рассмотренная система является обратимой и позволяет обогревать пассажирский салон.

Кроме кондиционирования, электробусы также могут иметь системы обогрева, которые работают по принципу электронагревательных приборов (столбец 2, табл. 2) – напольный электрический обогреватель или подогреватели воздуха.

Таблица 2

Применяемые системы терморегуляции пассажирского салона и рабочего места водителя

Парокомпрессионная установка (тепловой насос)	Электрический подогреватель (конвектор)	Дизельный жидкостный подогреватель
Работает на обогрев и охлаждение (мощность 20 кВт). Преимущества: - экономия эл. энергии (примерно в 2,5 раза) по отношению к электроподогревателю. Недостатки: - высокие стоимость и масса, расходует эл. энергию (снижается запас хода АТС).	Мощность 15-20 кВт. Преимущества: - малая масса. Недостатки: - высокие стоимость и масса, расходует эл. энергию (снижается запас хода АТС).	Мощность 35 кВт. Преимущества: - относительно невысокая стоимость и малая масса; - исключён расход электрической энергии. Недостатки: - использует не возобновляемые источники; - выбросы вредных веществ в атмосферу; - оставляет углеродный след.

Для эффективной работы системы терморегуляции в электробусах может быть также использована система управления. Она может автоматически регулировать работу кондиционирования воздуха или обогрева в зависимости от заданной температуры и настроек, тем самым обеспечивая комфортное состояние пассажирского салона, предотвращая перерасход энергии.

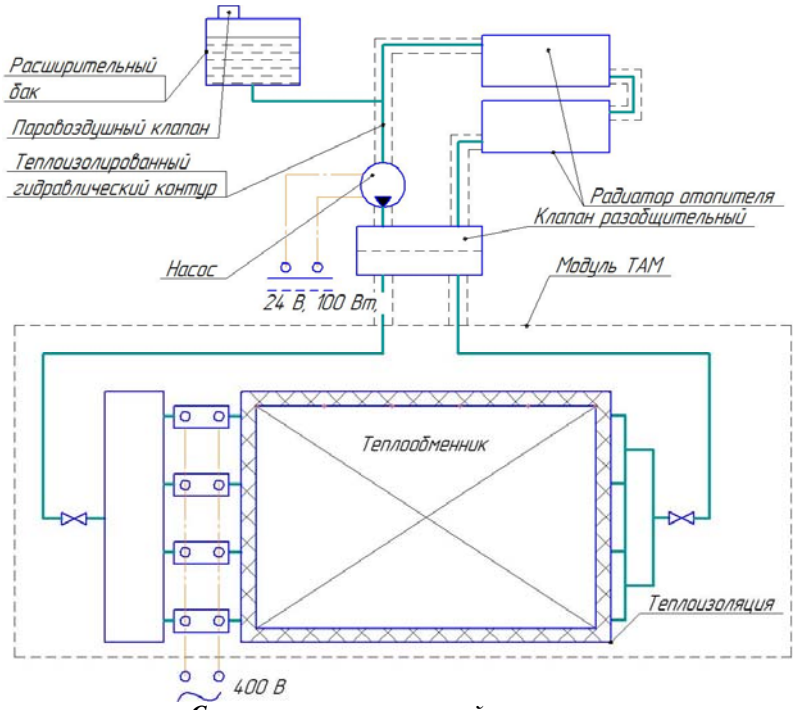


Схема терморегулирующей установки

Для обеспечения бесперебойной работы электробусов необходима работа целой инфраструктуры для их регулярной зарядки. Отметим, что расход электрической энергии электробусов на обогрев сопоставим и может значительно превышать её расход на тяговую мощность, даже с учетом рекуперации. Например, по результатам выполненного авторами численного моделирования процесса движения электробуса модели KAMAZ 6282 в условиях элементарного фрагмента ездового цикла SORT 2, электрическая энергия, запасенная в ВВБ, расходуется следующим образом:

– для питания тяговых электродвигателей (с учетом рекуперации): 4 МДж;
– для привода вспомогательных систем электробуса: 1,6 МДж;
– для отопления при использовании только электрического нагревателя: 5,26 МДж;
– для отопления при использовании только теплового насоса: 1,75 МДж.

Рассмотренные системы терморегуляции используют в качестве источника для обогрева электрическую энергию, запасенную в ВВБ, или углеводородное топливо. Их рабочий процесс основан на превращении энергии одного вида в другой – в тепловую энергию.

Организация обогрева также принципиально возможна с помощью теплового аккумулятора. Относительно высокой удельной энергоемкостью обладают устройства, в основе рабочего процесса которых лежат фазовые переходы первого рода типа плавление-кристаллизация, а в качестве теплоаккумулирующего материала (ТАМ) используют кристаллогидраты [8] и ряд низкомолекулярных органических соединений [9].

Источником теплоты является модуль ТАМ, который содержит теплообменник и нагревательный элемент. Теплообменник обеспечивает передачу тепла от ТАМ к теплоносителю при работе электробуса на маршруте и обратно – от теплообменника к ТАМ при зарядке на стоянке. Теплоноситель циркулирует с помощью насоса в гидравлическом контуре между теплообменником и радиаторами системы терморегуляции, которые обеспечивают теплообмен с салоном электробуса.

На рис. показана схема предлагаемой системы терморегуляции на основе ТАМ.

Отметим, что возможно «летнее» и «зимнее» снаряжение модуля ТАМ. Первое предусматривает применение ТАМ с температурой фазового перехода в диапазоне 30-70 °С, а второй – с более низкими температурами, вплоть до отрицательных.

Оснащение электробуса предлагаемой системой позволяет значительно снизить расход электрической энергии высоковольтной батареи в процессе эксплуатации электробуса. Полезный эффект может быть направлен либо на уменьшение емкости применяемой ВВБ, либо на увеличение дальности хода автотранспортного средства.

Недостатком предложенной системы является значительное повышение затрат энергии для нагрева ТАМ при стоянке электробуса (примерно в 1,9 раза); этот недостаток может быть компенсирован применением неэлектрических источников тепла (например, природного газа или других источников тепла) или за счёт увеличенной дальности хода электробуса исключить подзарядку его батареи в течение рабочего дня – это позволит осуществлять зарядку в ночное время суток по специальным тарифам.

Детальный анализ эффективности внедрения предлагаемой системы требует выполнения подробного экономического расчёта с определением соответствующих показателей – срока окупаемости и т.д.

Список литературы

1. Развитие электробусов в городе Москве // Мосгортранс. 6 с. [Электронный ресурс]. URL: https://transport.mos.ru/common/upload/docs/1502221228_prezentatsiya_elektrobusy.pdf (дата обращения: 27.09.2023).

2. Исследование технических характеристик электробусов, как перспективных видов наземного пассажирского транспорта / О.Н. Иванов, Н.О. Листаров, А.В. Остроухов // Международный журнал перспективных исследований. 2017. Т. 7. № 4-2. С. 29-48.

3. Эксплуатация электробусов в России / М. В. Битюков // Молодой ученый. 2022. № 48 (443). С. 21-25.

4. Официальный сайт компании «КАМАЗ» // «КАМАЗ». 2023. [Электронный ресурс]. URL: https://kamaz.ru/production/buses/ (дата обращения: 27.09.2023).

5. Информационный портал «Eltroll2.ru» // «Eltroll2.ru». 2023. [Электронный ресурс]. URL: https://eltroll2.ru/elbus/Elbus.php (дата обращения: 27.09.2023).

6. Официальный сайт компании «MAN» // «MAN». 2023. [Электронный ресурс]. https://www.bus.man.eu/man/media/content_medien/images/entry_page_russia_1/presse___medien_4/2021_16/spbtransportfest/MAN_Lions_City_E_Spec_A4.pdf (дата обращения: 27.09.2023).

7. Официальный сайт компании «Торговый Дом БКМ» // «Торговый Дом БКМ». 2023. [Электронный ресурс]. URL: https://tdbkm.ru/en/catalog/elektrobusy/ (дата обращения: 27.09.2023).

8. Соболев А.Ю. Исследование фазовых превращений в кристаллогидратах солей натрия и их смесях для использования в установках теплоаккумуляции: дисс. … канд. техн. наук: 05.14.04. Макеевка, 2018. – 160 с.

9. Покинтелица Е.А. Теплофизические особенности плавления и кристаллизации органических теплоаккумулирующих материалов группы дифенилов: дисс. … канд. техн. наук: 05.14.04. Макеевка, 2019. – 186 с.

Савенков Никита Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, n.v.savenkov@donnasa.ru, Россия, ДНР, Макеевка, Донбасская национальная академии строительства и архитектуры,

Покинтелица Елена Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, lnk0013@gmail.com, Россия, ДНР, Макеевка, Донбасская национальная академии строительства и архитектуры,

Моржухин Артём Маркович, старший преподаватель, morzhukhin92@yandex.ru, Россия, Дубна, Государственный университет «Дубна»

PROBLEMS AND DIRECTIONS OF SYSTEMS DEVELOPMENT THERMOREGULATION IN ELECTRIC BUSES

N.V. Savenkov, E.A. Pokintelitsa, A.M. Morzhukhin

This article discusses the related problems of operating electric buses on urban routes in relation to maintaining the required temperature of the passenger compartment and the driver's workplace, the relationship of this process with the power reserve when using various thermoregulation systems. As an alternative, systems based on heat-accumulating materials operating on the basis of phase transitions of the first kind are proposed. A critical analysis was carried out, directions for further development of the system were formulated.

Key words: electric bus, thermoregulation system, heating, high-voltage batteries, traction electric drive, energy efficiency, heat storage materials.

Savenkov Nikita Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor, head of chair, n.v.savenkov@donnasa.ru, Russia, DPR, Makeyevka, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture,

Pokintelitsa Elena Anatolyevna, candidate of technical sciences, docent, lnk0013@gmail.com, Russia, DPR, Makeyevka, FSBEI HE «Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture»,

Morzhukhin Artem Markovich, senior lecturer, morzhukhin92@yandex.ru, Russia, Dubna, Dubna State University

УДК 62-97/-98
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-609-610

МЕТОДИКА РАСЧЁТА СУММАРНОЙ ПОРШНЕВОЙ СИЛЫ ДЛЯ ТИХОХОДНЫХ АГРЕГАТОВ

С.С. Бусаров, И.С. Бусаров, К.А. Бакулин, Н.Г. Синицин

Существующие методики расчёта компрессорных агрегатов, используемые для быстроходных схем, рассчитаны на применении в качестве приводов асинхронных или синхронных электродвигателей. Достаточная на сегодняшний день проработка конструкций тихоходных поршневых ступеней привела к тому, что для проектирования новых агрегатов необходимо создание методики расчёта отражающей особенности функционирования тихоходных агрегатов. В данной работе начата разработка методики расчёта тихоходных агрегатов с линейным приводом.

Ключевые слова: линейный привод, закон движения, методика расчёта, рабочий процесс, динамический расчёт, поршневая сила.

В настоящее время существуют методики расчёта поршневых агрегатов одной из частей, которых является динамический расчёт [1]. На основании данных динамического расчёта выполняются прочностные расчёты элементов механизма движения или выбор существующей базы [2].

Рассматриваемые в данной работе поршневые тихоходные агрегаты [3] имеют линейные приводы. Одним из примеров таких приводов может служить гидравлический привод.

До настоящего времени отсутствуют данные по инженерным методикам расчётов рассматриваемых агрегатов. Естественно, методики, разрабатываемые для новых агрегатов, чаще всего, базируются на существующих, с учётом особенностей работы вновь проектируемых агрегатов. Для тихоходных длинноходовых агрегатов такими особенностями являются режимные и конструктивные параметры [4]. А именно длительное время цикла 1…4 с, соотношение хода поршня к диаметру цилиндра 5…20, отношение давления нагнетания к давлению всасывания 50… 120, наличие линейного привода при работе которого, в отличие от кривошипно-шатунных схем, где поршень движется с постоянным ускорением, имеются значительные промежутки времени, когда поршень движется с постоянной скоростью [5].

Основные корректировки в существующей методике расчёта будут касаться расчёта коэффициента подачи ступени и расчёта суммарной поршневой силы.

В данной статье рассмотрим расчёт суммарной поршневой силы.

Для сравнительного анализа суммарной поршневой силы в быстроходных и тихоходных схемах рассмотрим расчёт пример с использованием существующей методике расчёта [2] для оппозитной базы М160.

Суммарная сила P_Σ направленная вдоль оси цилиндра определяется по формуле:

$$P_\Sigma = P_{г'} + P_{г''} + P_{тр} + I_s \,, \tag{1}$$

где $P'_Г$ - газовая сила, действующая на поршень со стороны крышки, кН; $P''_Г$ - газовая сила, действующая на поршень со стороны механизма движения, кН; I_s – сила инерции поступательно движущихся масс, кН; $P_{тр}$ – сила трения в поступательно движущихся парах, кН.

Сила инерции I_s рассчитывается по формуле

$$I_s = m_s r\omega^2(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha) \tag{2}$$

Силу трения $P_{тр}$ в рядах полагают постоянной по модулю и меняющую знак в мертвых точках. Для её расчета воспользуемся формулой:

$$P_{тр} = \frac{0{,}6 \cdot N_и \cdot (1-\eta_{мех})}{2 \cdot S_п \cdot n \cdot \eta_{мех}} \tag{3}$$

где $N_и$ – индикаторная мощность, кВт; $\eta_{мех}$ – механический КПД.

Газовые силы $P'_Г$ и $P''_Г$ определяем из уравнения политропного процесса [6]. Полученная диаграмма имеет привычный вид (см. рисунок 1) [1].

Как уже отмечалось ранее, рассматриваемый тихоходный агрегат имеет линейный привод. Схема ступени с линейным гидравлическим приводом представлена на рисунке 2.

В данной схеме реализована жёсткая связь штока поршневой ступени со штоком гидравлического цилиндра. Поэтому для данной системы уравнение суммарной поршневой силы будет иметь следующий вид:

$$P_\Sigma = P_{TPст} + P_{TPпр} + P_{Г'} + P' + I_{Sст} + I_{Sпр} \,, \tag{4}$$

где $P_{TPст}$ – сила трения в поршневой ступени, Н; $P_{TPпр}$ – сила трения в приводном гидроцилиндре, Н; $I_{Sст}$ – сила инерции поступательно движущихся масс ступени, Н; $I_{Sпр}$ – сила инерции поступательно движущихся масс приводного гидроцилиндра, Н; $P_Г$ – газовая сила, Н; P'– сила, действующая со стороны штока в поршневой ступени, Н (фактически сила атмосферного давления).

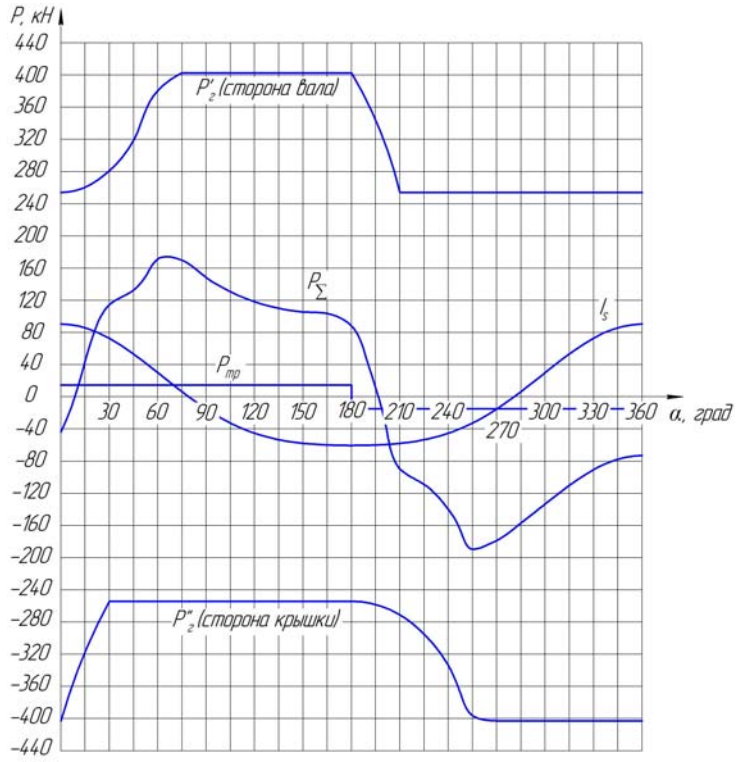


Рис. 1. Диаграмма суммарной поршневой силы для базы М160 при следующих параметрах рабочего процесса: $P_{вс}$= 3,92 МПа, $T_{вс}$=313 К, $P_н$=5,88 МПа, V_e= 0,84 м³/с (3024 м³/ч), n_0 = 375 об/мин, рабочее тело – водородсодержащий газ

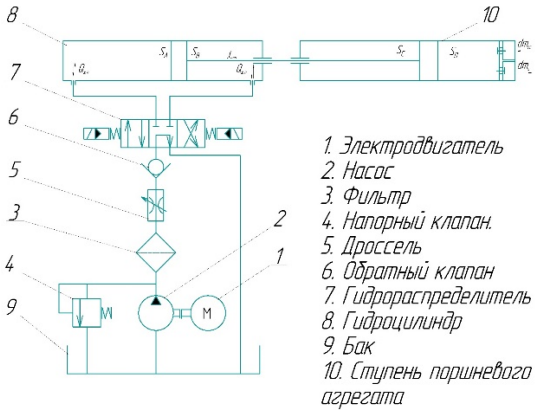


Рис. 2. Схема ступени с линейным гидравлическим приводом

Основное отличие состоит в определении силы инерции и силы трения. Для применяемого линейного гидравлического привода характерно начало движения с ускорением, затем движение с постоянной скоростью, торможение, ускорение в противоположном направлении, движение с постоянной скоростью и торможение. Затем цикл повторяется. Причём при жёсткой связи поршня с приводом будет принята суммарная масса поступательно движущихся частей поршневой ступени и приводного гидроцилиндра.

На участках разгона и торможения сила инерции по модулю равна:

$$I_{Scm} + I_{Snp} = (m_{Scm} + m_{Snp}) \times a, \tag{5}$$

где a – ускорение разгона или торможения, м/с2; m_{Scm} – масса поступательно движущихся деталей ступени, кг; m_{Snp} – масса поступательно движущихся деталей привода, кг.

При движении с постоянной скоростью ускорение равно нулю.

Сила трения в гидроприводе будет складываться из трения между поршнем и цилиндром, штоком и крышкой. Расчет силы трения при уплотнении резиновыми кольцами производится по следующей формуле [7]:

$$P_{TPnp} = \pi \cdot D \cdot b \cdot f \cdot p_{\partial}, \tag{6}$$

где D - диаметр поршня приводного гидроцилиндра, м; b - ширина контактной поверхности, м; f - коэффициент трения; p_{∂} - рабочее давление, Па.

На поршне тихоходной длинноходовой ступени поршневого компрессора установлены манжетные уплотнения. В данных уплотнениях сила трения будет определяться начальным давлением при монтаже уплотнения и переменным давлением, возникающим при сжатии газа.

Расчет силы трения при манжетном уплотнении будет определяться по следующей формуле [7]:

$$P_{TPcm} = \pi \cdot D_{cm} \cdot b_{cm} \cdot f_{cm} \cdot n \cdot (p + p_к - p^{/}) \ , \qquad (7)$$

где D_{cm} - диаметр поршня, м; b_{cm} - ширина контактной поверхности, м; f_{cm} - коэффициент трения; p - рабочее давление, Па; $p_к$ - контактное давление, возникающее при монтаже уплотнения, равное 0,16 МПа, $p^{/}$ - давление со стороны штока, равное атмосферному.

Диаграмма суммарной поршневой силы для тихоходного агрегата с линейным приводом представлена на рисунках 3,4.

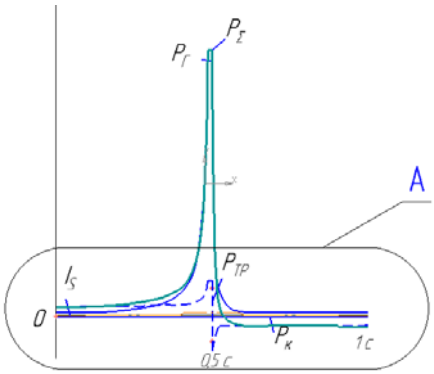


Рис. 3. Индикаторная диаграмма при следующих параметрах рабочего процесса: $P_{вс}$= 0,1 МПа, $T_{вс}$=290 К, $P_н$=10 МПа, $V_е$= 1,6 м³/ч, τ = 60 циклов в мин., рабочее тело – воздух

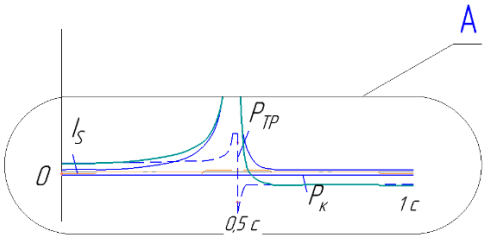


Рис. 4. Вид А

Характерной особенностью полученных графиков (рисунок 3,4) является нетипичный вид силы инерции, обусловленный периодически возникающим ускорением в окрестностях верхней и нижней мёртвых точек, сравнительно небольшой величины. Большую часть времени ускорение отсутствует и поэтому сила инерции имеет нулевое значение. Сила трения также значительно отличается по своей конфигурации от силы, изображённой на рисунке 1, обусловлено это зависимостью силы от давления сжимаемого газа при установке манжетных уплотнений. Необходимо отметить, что другой вид уплотнений нецелесообразно применять в тихоходных поршневых агрегатах.

Выводы. Полученные результаты на примере расчёта суммарной поршневой силы показали необходимость полной корректировки методики расчёта поршневых компрессорных агрегатов применительно к тихоходным ступеням с линейным приводом. Надо заметить, что сила инерции, рассчитанная для варианта с гидравлическим линейным приводом, является частным случаем. В настоящее время ведутся исследования по регулированию движения выходного звена агрегата с определением оптимального алгоритма работы [8]. Применение же электромеханических приводов [9] вообще может иметь очень большое количество вариантов режимов работы привода, зависящих от программы, заложенной в управляющий контроллер. Поэтому сила инерции в обобщённой методике расчёта тихоходных агрегатов с линейным приводом будет описана некоторым общим уравнением с указанием вариантов реализации законов управления приводом.

Список литературы

1.Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. В 2 т. Т. 1. Теория и расчёт. М.: Колос, 2000. 456 с.

2.Юша В.Л. Теория, расчёт и конструирование поршневых компрессоров: Учебное пособие по курсовому проектированию. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. 120 с.

3.Громов А.Ю. Разработка поршневых ступеней с линейным приводом для малорасходных компрессорных агрегатов и исследование их рабочих процессов: Автореф. дис. … канд. техн. наук / Громов Антон Юрьевич. Омск, 2017. 18 с.

4.Бусаров С.С., Громов А.Ю., Бусаров И.С., Титов Д.С., Васильев В.К. Модернизация методики расчёта процессов теплообмена в рабочей камере воздушного одноступенчатого тихоходного поршневого компрессора среднего давления на основании экспериментальных исследований // Компрессорная техника и пневматика. 2017. №3. С. 14 – 18.

5.Yusha V.L., Dengin V.G., Karagusov V.I., Busarov S.S. Theoretical analysis of the working process of the superlow rotary low expense piston compressor with the increased piston stroke, 8th International Conference on Compressors and Coolants, 2013. Papiernicka, Slovakia. Book of abstracts. P. 22.

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

7.Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. М.: Колос, 2008. Т. 2. 711 с.

8. Юша В.Л., Бусаров С.С., Недовенчаный А.В. Оценка взаимосвязи между законом перемещения поршня тихоходной длинноходовой ступени и характеристиками привода компрессорного агрегата Компрессорная техника и пневматика. 2018. №2. С. 11 – 15.

9.Громов А.Ю. Разработка поршневых ступеней с линейным приводом для малорасходных компрессорных агрегатов и исследование их рабочих процессов: дис. … канд. техн. наук / Громов Антон Юрьевич. Омск, 2017. 210 с.

Бусаров Сергей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, bssi1980@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Бусаров Игорь Сергеевич, ассистент, habr86@mail.ru, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Бакулин Константин Александрович, бакалавр, Россия, Омск, Омский государственный технический университет,

Синицин Никита Глебович, магистрант, Россия, Омск, Омский государственный технический университет

THE METHOD OF CALCULATING THE TOTAL PISTON FORCE FOR LOW-SPEED UNITS

S.S. Busarov, I.S. Busarov, K.A. Bakulin, N.G. Sinitsyn

The existing methods of calculating compressor units used for high-speed circuits are designed to be used as drives of asynchronous or synchronous electric motors. To date, sufficient elaboration of the designs of low-speed piston stages has led to the fact that for the design of new units it is necessary to create a calculation methodology reflecting the features of the functioning of low-speed units. In this work, the development of a methodology for calculating low-speed units with a linear drive has begun.

Key words: linear actuator, law of motion, calculation method, workflow, dynamic calculation, piston force.

Busarov Sergey Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, bssi1980@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Busarov Igor Sergeevich, assistant, habr86@mail.ru, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Bakulin Konstantin Alexandrovich, bachelor's degree, Russia, Omsk, Omsk State Technical University,

Sinitsin Nikita Glebovich, undergraduate, Russia, Omsk, Omsk State Technical University

УДК 539.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-612-613

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КУЛАЧКОВОГО КОРОМЫСЛОВОГО МЕХАНИЗМА

Н.И. Федоринин

Предложена дискретная математическая модель плоского кулачкового коромыслового механизма. Предполагается, что звенья механизма являются абсолютно твердыми телами, а их упруго-диссипативные свойства приведены к безинерционным связям, сопрягающим эти тела. Принята кусочно-линейная зависимость деформаций растяжения-сжатия связей от действующих нагрузок, обусловленная наличием зазоров в сопряжениях звеньев. Учтено сухое трение в сопряжениях звеньев. Получена система дифференциальных уравнений, моделирующая движение механизма.

Ключевые слова: кулачковый механизм, упруго-диссипативные связи, дискретная математическая модель, зазоры, сухое трение, кинематическое замыкание.

Кулачковые механизмы вплоть до настоящего времени являются основным техническим устройством, обеспечивающим прерывистое движение выходного звена при непрерывном вращении задающего звена. Например, механизмы открытия-закрытия клапанов двигателей внутреннего сгорания, различные автоматизированные и роботизированные устройства, запирающие механизмы стрелочных переводов и многое другое.

В настоящей работе предпринята попытка создать детерминированную модель кулачкового механизма, учитывающую упруго-диссипативные свойства звеньев, наличие зазоров и сил сухого трения в сопряжениях этих звеньев.

Кулачковый коромысловый механизм включает кулак (поз. 1 на рис. 1), коромысло (поз. 2) и ролик (поз. 3). Начало абсолютной системы координат *XOY* находится в центре вращения кулака (точка А на рис. 1). Начало местной системы координат кулака *xoy* находится там же, а начало местной системы координат коромысла *xoy* находится в центре вращения коромысла (точка В на рис. 1). Номинальное расстояние от центра вращения кулака до центра вращения коромысла (АВ на рис. 1) равно L. Угол положения межцентрового расстояния АВ в абсолютной системе координат β_L. Номинальное расстояние от центра вращения коромысла до центра ролика (длина коромысла и отрезок ВС на рис. 1) равно l. Радиус ролика r (CD на рис. 1).

Геометрия профиля кулака разрабатывалась в соответствии с [1].

Номинальный угол поворота коромысла вокруг точки B

$$\beta = \beta_0 + f(\theta)\cdot(\beta_k - \beta_0) \tag{1}$$

где β_0, β_k – номинальные углы крайних положений коромысла; $\theta = \dfrac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_k - \varphi_0}$ – безразмерный угол поворота кулака; φ – номинальный угол поворота кулака; φ_0, φ_k – номинальные углы поворота кулака, соответствующие началу и окончанию движения коромысла; $f(\theta)$ – закон движения коромысла.

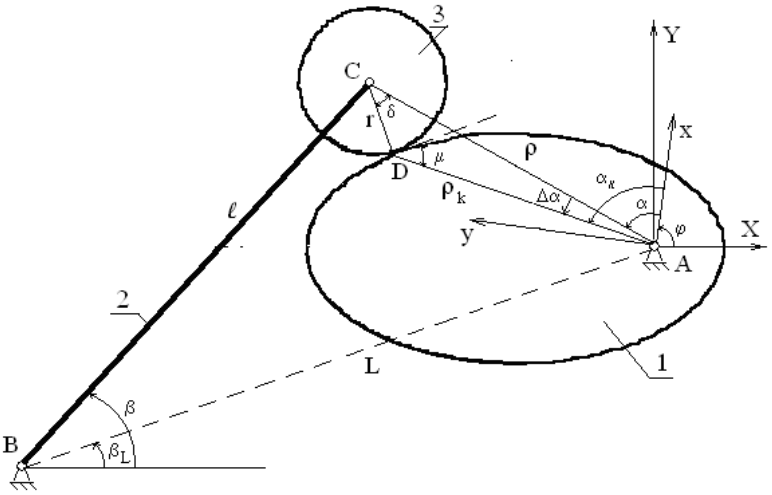


Рис. 1. Кинематическая схема кулачкового коромыслового механизма

Номинальная угловая скорость коромысла, учитывая (1)

$$\omega_\beta = \frac{d\beta}{dt} = \beta'\omega;$$

где $\beta' = f'(\theta)\cdot\dfrac{\beta_k - \beta_0}{\varphi_k - \varphi_0}$; $f'(\theta) = \dfrac{\partial f}{\partial \theta}$; ω – угловая скорость кулака.

Номинальное угловое ускорение коромысла

$$\varepsilon_\beta = \frac{d\omega_\beta}{dt} = \beta''\omega^2 + \beta'\varepsilon,$$

где $\beta'' = f''(\theta)\cdot\dfrac{\beta_k - \beta_0}{(\varphi_k - \varphi_0)^2}$; ε – угловое ускорение кулака.

Радиус-вектор теоретического профиля кулака (расстояние AC на рис.1) со своими частными производными

$$\rho = \sqrt{L^2 + l^2 - 2Ll\cos(\beta - \beta_L)}$$
$$\rho' = \frac{Ll\sin(\beta - \beta_L)}{\rho}\beta' \tag{2}$$
$$\rho'' = \frac{Ll\beta''\sin(\beta - \beta_L) + Ll\beta'^2\cos(\beta - \beta_L) - \rho'^2}{\rho}.$$

Угол положения радиус-вектора теоретического профиля кулака относительно местной системы координат (полярный угол) со своими частными производными

$$\alpha = \angle CAx = \pi + \beta_L - \arccos\frac{L^2 + \rho^2 - l^2}{2L\rho} - \varphi$$
$$\alpha' = \frac{\rho + L\cos(\alpha + \varphi - \beta_L)}{L\rho\sin(\alpha + \varphi - \beta_L)}\rho' - 1 \tag{3}$$
$$\alpha'' = \frac{\rho'^2 + \rho\rho'' + L\rho''\cos(\alpha + \varphi - \beta_L) - L\rho\cos(\alpha + \varphi - \beta_L)(\alpha' + 1)^2}{L\rho\sin(\alpha + \varphi - \beta_L)} -$$
$$- 2\rho'(\alpha' + 1)$$

Радиус-вектор точки C теоретического профиля кулака в местной системе координат со своими частными производными

$$\overline{\rho} = \begin{pmatrix} \rho_x \\ \rho_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho\cos\alpha \\ \rho\sin\alpha \end{pmatrix};\ \ \overline{\rho}' = \begin{pmatrix} \rho'_x \\ \rho'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho'\cos\alpha - \rho\alpha'\sin\alpha \\ \rho'\sin\alpha + \rho\alpha'\cos\alpha \end{pmatrix};$$

$$\overline{\rho}'' = \begin{pmatrix} \rho''_x \\ \rho''_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho''\cos\alpha - 2\rho'\alpha'\sin\alpha - \rho\alpha''\sin\alpha - \rho\alpha'^2\cos\alpha \\ \rho''\sin\alpha + 2\rho'\alpha'\cos\alpha + \rho\alpha''\cos\alpha - \rho\alpha'^2\sin\alpha \end{pmatrix}$$

Пренебрегаем инерционностью ролика (масса ролика и его момент инерции равны нулю). Кроме того, будем считать, что радиус ролика равен нулю ($r = 0$), т.е. теоретический и практический профили совпадают.

В этом случае имеем систему двух твердых тел (кулак и коромысло массами m_T, m_U и собственными моментами инерции J_T, J_U соответственно), соединенных между собой и с корпусом упруго-диссипативными связями, имеющими жесткость C_1, C_2, C_3 и коэффициенты диссипации B_1, B_2 *и* B_3 (рис. 2), аналогично [2].

В качестве обобщенных координат принимаем абсолютные координаты точки S, принадлежащей кулаку, и точки K, принадлежащей коромыслу: X_S, Y_S, X_K, Y_K, а также углы поворота местных осей координат кулака и ведущего плеча KD коромысла относительно абсолютных – φ_p и β_p.

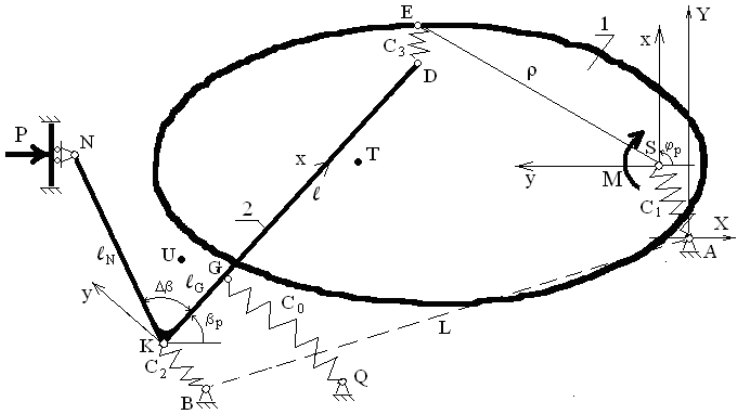


Рис. 2. Расчетная схема механизма с учетом упруго-диссипативных связей между звеньями.

Абсолютные координаты точек A, B и Q (постоянные величины)

$$X_A = 0;\ \ Y_A = 0;$$

$$X_B = L\cos(\beta_L - \pi) = -L\cos\beta_L;\ \ Y_B = L\sin(\beta_L - \pi) = -L\sin\beta_L;$$

$$X_Q = X_B + l_G\cos\beta_0 + \left(\frac{F_{\min}}{C_0} + L_0\right)\sin\beta_0; \tag{4}$$

$$Y_Q = Y_B + l_G\sin\beta_0 - \left(\frac{F_{\min}}{C_0} + L_0\right)\cos\beta_0,$$

где $F_{\min}$ – минимальное необходимое усилие кинематического замыкания механизма; L_0 – длина пружины замыкания в свободном состоянии.

Абсолютные координаты точек D и G и их скорости

$$X_D = X_K + l\cos\beta_p;\ \ Y_D = Y_K + l\sin\beta_p;$$

$$X_G = X_K + l_G\cos\beta_p;\ \ Y_G = Y_K + l_G\sin\beta_p;\ \ \dot{X}_D = \dot{X}_K - l\dot{\beta}_p\sin\beta_p;$$

$$\dot{Y}_D = \dot{Y}_K + l\dot{\beta}_p\cos\beta_p; \tag{5}$$

$$\dot{X}_G = \dot{X}_K - l_G\dot{\beta}_p\sin\beta_p;\ \ \dot{Y}_G = \dot{Y}_K + l_G\dot{\beta}_p\cos\beta_p.$$

Абсолютные координаты точки E теоретического профиля с учетом (2) и (3)

$$\begin{pmatrix} X_E \\ Y_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos\varphi_p & -\sin\varphi_p \\ \sin\varphi_p & \cos\varphi_p \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \rho\cos\alpha \\ \rho\sin\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_S + \rho\cos(\varphi_p + \alpha) \\ Y_S + \rho\sin(\varphi_p + \alpha) \end{pmatrix}, \tag{6}$$

где $\begin{pmatrix} \cos\varphi_p & -\sin\varphi_p \\ \sin\varphi_p & \cos\varphi_p \end{pmatrix}$ – матрица перехода от местной системы координат кулака к абсолютной.

Частные производные координат точки E по номинальному углу поворота кулака φ (учтем, что $\frac{\partial\varphi_p}{\partial\varphi} = 0$, $\frac{\partial X_S}{\partial\varphi} = 0$ и $\frac{\partial Y_S}{\partial\varphi} = 0$)

$$X'_E = \rho' \cos(\varphi_p + \alpha) - \rho\alpha' \sin(\varphi_p + \alpha); \quad (7)$$
$$Y'_E = \rho' \sin(\varphi_p + \alpha) + \rho\alpha' \cos(\varphi_p + \alpha).$$

Скорость точки E

$$\dot{X}_E = k_1 + X'_E \dot{\varphi} \quad (8)$$
$$\dot{Y}_E = k_2 + Y'_E \dot{\varphi}$$

где $k_1 = \dot{X}_S - \rho \sin(\varphi_p + \alpha)\dot{\varphi}_p$; $k_2 = \dot{Y}_S + \rho \cos(\varphi_p + \alpha)\dot{\varphi}_p$.

Полные производные от выражений (8)

$$\dot{X}'_E = -Y'_E \dot{\varphi}_p + k_4 \dot{\varphi}; \; \dot{Y}'_E = X'_E \dot{\varphi}_p + k_6 \dot{\varphi};$$

где

$$k_4 = \rho'' \cos(\varphi_p + \alpha) - 2\rho'\alpha' \sin(\varphi_p + \alpha) - \rho\alpha'' \sin(\varphi_p + \alpha) - \rho\alpha'^2 \cos(\varphi_p + \alpha);$$

$$k_6 = \rho'' \sin(\varphi_p + \alpha) + 2\rho'\alpha' \cos(\varphi_p + \alpha) + \rho\alpha'' \cos(\varphi_p + \alpha) - \rho\alpha'^2 \sin(\varphi_p + \alpha).$$

Точка E – это ближайшая к D точка профиля кулака. Поэтому координаты точки E ищем из условия, что расстояние $DE = \sqrt{(X_E - X_D)^2 + (Y_E - Y_D)^2}$ будет минимальным, т.е. $\frac{\partial DE}{\partial \varphi} = 0$.

Фактически ищем угол φ (не путать с φ_p), удовлетворяющий уравнению (учтем, что $\frac{\partial X_D}{\partial \varphi} = 0$, $\frac{\partial Y_D}{\partial \varphi} = 0$)

$$(X_E - X_D)X'_E + (Y_E - Y_D)Y'_E = 0. \quad (9)$$

С учетом соотношений (4)-(7) выражение (9) представляет собой трансцендентное уравнение для определения номинального угла поворота кулака φ, соответствующего положению точки E на теоретическом профиле.

Продифференцировав по времени выражение (9), получим после преобразований выражение для угловой скорости кулака

$$\dot{\varphi} = \frac{-(k_1 - \dot{X}_D)X'_E + (X_E - X_D)Y'_E\dot{\varphi}_p - (k_2 - \dot{Y}_D)Y'_E - (Y_E - Y_D)X'_E\dot{\varphi}_p}{X'^2_E + (X_E - X_D)k_4 + Y'^2_E + (Y_E - Y_D)k_6}$$

Движение механизма происходит под действием момента двигателя M, полезной нагрузки P и пружины жесткостью C_0, обеспечивающей кинематическое замыкание механизма (рис. 2).

Будем считать, что момент двигателя, создающего крутящий момент на валу кулака, все время стремится обеспечить ему равномерное вращение с заданной скоростью, как это предложено в [3]

$$M = \begin{cases} k(\omega_{p0} - \dot{\varphi}_p)\dfrac{t}{t_d} & \text{если } t < t_d \\ k(\omega_{p0} - \dot{\varphi}_p) & \text{если } t \geq t_d \end{cases} \quad (10)$$

где $k > 0$ – постоянная двигателя; $\omega_{p0} < 0$ – номинальная угловая скорость вращения кулака; t_d – время разгона электродвигателя при пуске.

Номинальное начальное положение точки N коромысла по оси X

$$X_{N\text{э}} = X_B + l_N \cos(\beta_0 + \Delta\beta),$$

где $\Delta\beta > 0$ – угол створа между ведущим (KD) и ведомым (KN) плечами коромысла; l_N – длина ведомого плеча коромысла.

Текущее положение точки N коромысла по оси X

$$X_N = X_K + l_N \cos(\beta_p + \Delta\beta).$$

Рабочий ход точки N коромысла

$$h = X_{N\text{э}} - X_N.$$

Скорость рабочего хода точки N коромысла

$$V_N = \dot{h} = -\dot{X}_N = -\dot{X}_K + l_N\dot{\beta}_p \sin(\beta_p + \Delta\beta)$$

График усилия *P*, необходимого для выполнения полезной работы механизмом, в зависимости от величины рабочего хода точки N коромысла *h* (диаграмма нагружения) показан на рис. 3 [4]. Участки нагрузки 1, 2 и 3 говорят о том, что в случае возникновения обратного хода точки N ($V_N > 0$) на участке от h_1 до h_4, разгрузка (и, соответственно, повторное нагружение в случае изменения знака скорости) происходит так же, как на участке от h_1 до h_2. Положение участков 1-3 на рисунке показано произвольно.

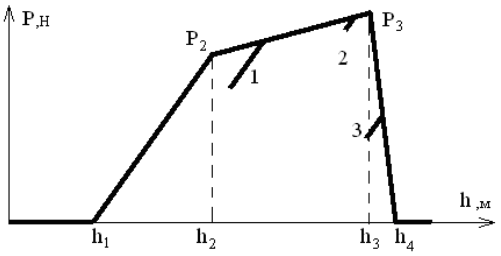


Рис. 3. График изменения полезной нагрузки на выходном звене механизма

Введем параметр $\widetilde{h} = \widetilde{h}(h)$, который все время совпадает с h, если нагружение осуществляется по основной ветви, или остается постоянным (равным соответствующему основному), если по участкам 1-3

$$\widetilde{h} = \begin{cases} h & \text{если } \mathrm{V_N} \le 0 \\ h_0 = const & \text{если } \mathrm{V_N} > 0 \text{ или } (\mathrm{V_N} \le 0 \text{ и } h_0 > h) \end{cases}$$

Усилие полезной нагрузки

$$P = \begin{cases} 0, & \text{если } \widetilde{h} \le h_1 \text{ или } \widetilde{h} \ge h_4 \text{ или } P \le 0 \\ \lambda_1 (h - h_1) & \text{если } h_1 < \widetilde{h} \le h_2 \text{ и P} > 0 \\ P_2 + \lambda_2 (\widetilde{h} - h_2) - \lambda_1 (\widetilde{h} - h) & \text{если } h_2 < \widetilde{h} \le h_3 \text{ и P} > 0 \\ P_3 - \lambda_3 (\widetilde{h} - h_3) - \lambda_1 (\widetilde{h} - h) & \text{если } h_3 < \widetilde{h} < h_4 \text{ и P} > 0 \end{cases} \tag{11}$$

где $\lambda_1 = \dfrac{P_2}{h_2 - h_1}$, $\lambda_2 = \dfrac{P_3 - P_2}{h_3 - h_2}$, $\lambda_3 = \dfrac{P_3}{h_4 - h_3} -$ коэффициенты, определяющие угол наклона соответствующего прямого участка нагружения к оси абсцисс; $P_2, P_3 -$ усилия, при которых меняется линейная зависимость нагружения; $h_1, h_2, h_3, h_4 -$ границы линейных участков диаграммы нагружения.

Деформации пружин с учетом (4)-(6)

$$\delta_0 = \sqrt{(X_Q - X_G)^2 + (Y_Q - Y_G)^2} - L_0;$$

$$\delta_1 = \sqrt{(X_S - X_A)^2 + (Y_S - Y_A)^2} - \Delta_1 = \sqrt{X_S{}^2 + Y_S{}^2} - \Delta_1; \tag{12}$$

$$\delta_2 = \sqrt{(X_K - X_B)^2 + (Y_K - Y_B)^2} - \Delta_2; \quad \delta_3 = \sqrt{(X_D - X_E)^2 + (Y_D - Y_E)^2} - \Delta_3,$$

где Δ_1, Δ_2, $\Delta_3 -$ зазоры в сопряжениях пружин с телами.

Скорости деформации пружин с учетом (5), (7) и (8)

$$\dot{\delta}_1 = \frac{\dot{X}_S X_S + \dot{Y}_S Y_S}{\delta_1 + \Delta_1};$$

$$\dot{\delta}_2 = \frac{(X_K - X_B)\dot{X}_K + (Y_K - Y_B)\dot{Y}_K}{\delta_2 + \Delta_2}; \tag{13}$$

$$\dot{\delta}_3 = \frac{(X_D - X_E)(\dot{X}_D - \dot{X}_E) + (Y_D - Y_E)(\dot{Y}_D - \dot{Y}_E)}{\delta_3 + \Delta_3},$$

Усилия пружин (пружина замыкания всегда находится в растянутом состоянии, т.е. зазоры всегда выбраны) с учетом (12)

$$F_0 = C_0 \delta_0; \qquad F_i = \begin{cases} C_i \delta_i, & \delta_i > 0 \\ 0 & \delta_i \le 0 \end{cases}, \tag{14}$$

где $i = 1,2,3 -$ индекс пружин.

Диссипативные силы с учетом (13) [2]

$$F_{iD} = \begin{cases} -B_i \dot{\delta}_i & \text{если } \dot{\delta}_i > 0 \text{ и } \left| B_i \dot{\delta}_i \right| < F_i \\ 0 & \text{если } \dot{\delta}_i \le 0 \text{ или } \left| B_i \dot{\delta}_i \right| \ge F_i \end{cases} \tag{15}$$

Углы взаимного относительного расположения точек, выбираемые из интервала $[0;2\pi)$ с учетом (4)-(6)

$$\varphi_{SA} = arctg \frac{Y_S - Y_A}{X_S - X_A} = arctg \frac{Y_S}{X_S}; \; \varphi_{AS} = \varphi_{SA} + \pi;$$

$$\varphi_{KB} = arctg \frac{Y_K - Y_B}{X_K - X_B}; \quad \varphi_{BK} = \varphi_{KB} + \pi;$$

$$\varphi_{DE} = arctg\frac{Y_D - Y_E}{X_D - X_E}; \qquad \varphi_{ED} = \varphi_{DE} + \pi; \tag{16}$$
$$\varphi_{QG} = arctg\frac{Y_Q - Y_G}{X_Q - X_G}; \quad \varphi_{GQ} = \varphi_{QG} + \pi.$$

Если числитель и знаменатель приведенных выражений (16) одновременно окажется равным 0, принимаем, что угол равен нулю (в этом случае соответствующая сила упругости равна нулю, поэтому угол не имеет значения).

Моменты пружин, действующих на тела механизма, относительно центров масс этих тел (точка T для кулака, точка U для коромысла) с учетом нагрузок (12), (14), (15) (в обозначении моментов первый индекс указывает, на какое тело воздействует сила, а второй какая именно сила)

$$\begin{gathered}
M_{T1} = (F_1 + F_{1D})y_T\cos(\varphi_{AS} - \varphi_p);\\
M_{T3} = (F_3 + F_{3D})\big(\rho_x\sin(\varphi_{DE} - \varphi_p) - (\rho_y - y_T)\cos(\varphi_{DE} - \varphi_p)\big);\\
M_{U2} = (F_2 + F_{2D})\big(-x_U\sin(\varphi_{BK} - \beta_p) + y_U\cos(\varphi_{BK} - \beta_p\big);\\
M_{U3} = (F_3 + F_{3D})\big((l - x_U)\sin(\varphi_{ED} - \beta_p) + y_U\cos(\varphi_{ED} - \beta_p)\big);\\
M_{U0} = F_0\big((l_G - x_U)\sin(\varphi_{QG} - \beta_p) + y_U\cos(\varphi_{QG} - \beta_p)\big);\\
M_{UP} = -P\big((x_N - x_U)\sin\beta_p + (y_N - y_U)\cos\beta_p\big),
\end{gathered} \tag{17}$$

где $x_N = l_N\cos\Delta\beta$, $y_N = l_N\sin\Delta\beta -$ местные координаты точки N; $x_S = y_S = 0 -$ местные координаты точки S; $x_T = 0, y_T -$ местные координаты центра масс кулака; $x_K = y_K = 0 -$ местные координаты точки K; $x_U, y_U -$ местные координаты центра масс коромысла; $x_D = l, y_D = 0 -$ местные координаты точки D; $x_G = l_G, y_G = 0 -$ местные координаты точки G.

Обозначив суммарные моменты движущих сил кулака и коромысла

$$M_T = M + M_{T1} + M_{T3},\ M_U = M_{U2} + M_{U3} + M_{U0} + M_P, \tag{18}$$

а также предельные значения моментов трения с учетом (14)

$$M_{predT} = |F_1|r_S + |F_3|r_E;\ M_{predU} = |F_2|r_K + |F_3|r_D + |F_0|r_G + |P|r_N,$$

где $r_S, r_E, r_K, r_D, r_G, r_E -$ радиусы трения в шарнирах S, E, K, D, G и N, определим моменты сил сухого трения

$$M_{trT} = \begin{cases} M_{predT}sign(\dot\varphi_p) & |\dot\varphi_p| > \varepsilon \\ M_{predT}sign(M_T) & |\dot\varphi_p| \le \varepsilon \text{ и } |M_T| > M_{predT} \\ M_T & |\dot\varphi_p| \le \varepsilon \text{ и } |M_T| \le M_{predT} \end{cases}, \tag{19}$$

$$M_{trU} = \begin{cases} M_{predU}sign(\dot\beta_p) & |\dot\beta_p| > \varepsilon \\ M_{predU}sign(M_U) & |\dot\beta_p| \le \varepsilon \text{ и } |M_U| > M_{predU} \\ M_U & |\dot\beta_p| \le \varepsilon \text{ и } |M_U| \le M_{predU} \end{cases}$$

где $sign(x) = \begin{cases} 1 & \text{если } x > 0 \\ 0 & \text{если } x = 0 - \\ -1 & \text{если } x < 0 \end{cases}$ единичная функция, $\varepsilon -$ малое значение угловой скорости, по достижении которой будем считать, что тело перестало поворачиваться.

Введем обозначения

$$\Delta x_T = x_T\cos\varphi_p - y_T\sin\varphi_p = -y_T\sin\varphi_p;\ \Delta y_T = x_T\sin\varphi_p + y_T\cos\varphi_p = y_T\cos\varphi_p;$$
$$\Delta x_U = x_U\cos\beta_p - y_U\sin\beta_p;\ \Delta y_U = x_U\sin\beta_p + y_U\cos\beta_p.$$

Тогда абсолютные координаты центра масс кулака, а также их производные

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos\varphi_p & -\sin\varphi_p \\ \sin\varphi_p & \cos\varphi_p \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_T \\ y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_S + \Delta x_T \\ Y_S + \Delta y_T \end{pmatrix};\ \begin{pmatrix} \dot X_T \\ \dot Y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot X_S - \Delta y_T\dot\varphi_p \\ \dot Y_S + \Delta x_T\dot\varphi_p \end{pmatrix}; \tag{20}$$
$$\begin{pmatrix} \ddot X_T \\ \ddot Y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot X_S - \Delta y_T\ddot\varphi_p - \Delta x_T\dot\varphi_p{}^2 \\ \ddot Y_S + \Delta x_T\ddot\varphi_p - \Delta y_T\dot\varphi_p{}^2 \end{pmatrix}.$$

Абсолютные координаты центра масс коромысла и их производные

$$\begin{pmatrix} X_U \\ Y_U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_K \\ Y_K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos\beta_p & -\sin\beta_p \\ \sin\beta_p & \cos\beta_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_U \\ y_U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_K + \Delta x_U \\ Y_K + \Delta y_U \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_U \\ \dot{Y}_U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_K - \Delta y_U \dot{\beta}_p \\ \dot{Y}_K + \Delta x_U \dot{\beta}_p \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \ddot{X}_U \\ \ddot{Y}_U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{X}_K - \Delta y_U \ddot{\beta}_p - \Delta x_U \dot{\beta}_p^{\,2} \\ \ddot{Y}_K + \Delta x_U \ddot{\beta}_p - \Delta y_U \dot{\beta}_p^{\,2} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где $\begin{pmatrix} \cos\beta_p & -\sin\beta_p \\ \sin\beta_p & \cos\beta_p \end{pmatrix}$ – матрица перехода от местной системы координат коромысла к абсолютной.

Уравнения движения кулака и коромысла с учетом (14), (15), (17), (18) и (19)

$$m_T \ddot{X}_T = (F_1 + F_{1D})\cos\varphi_{AS} + (F_3 + F_{3D})\cos\varphi_{DE};$$
$$m_T \ddot{Y}_T = (F_1 + F_{1D})\sin\varphi_{AS} + (F_3 + F_{3D})\sin\varphi_{DE} - m_T g;$$
$$J_T \ddot{\varphi}_p = M_T - M_{trT}; \quad (22)$$
$$m_U \ddot{X}_U = (F_2 + F_{2D})\cos\varphi_{BK} + (F_3 + F_{3D})\cos\varphi_{ED} + F_0\cos\varphi_{QG} + P;$$
$$m_U \ddot{Y}_U = (F_2 + F_{2D})\sin\varphi_{BK} + (F_3 + F_{3D})\sin\varphi_{ED} + F_0\sin\varphi_{QG} - m_U g;$$
$$J_U \ddot{\beta}_p = M_U - M_{trU}.$$

Учитывая зависимости (20) и (21), получим из (22)

$$m_T \ddot{X}_S - m_T \Delta y_T \ddot{\varphi}_p = F_1\cos\varphi_{AS} + F_3\cos\varphi_{DE} + m_T \Delta x_T \dot{\varphi}_p^{\,2};$$
$$m_T \ddot{Y}_S + m_T \Delta x_T \ddot{\varphi}_p = F_1\sin\varphi_{AS} + F_3\sin\varphi_{DE} - m_T g + m_T \Delta y_T \dot{\varphi}_p^{\,2}; \quad J_T \ddot{\varphi}_p = M_T - M_{trT};$$
$$m_U \ddot{X}_K - m_U \Delta y_U \ddot{\beta}_p = F_2\cos\varphi_{BK} + F_3\cos\varphi_{ED} + F_0\cos\varphi_{QG} + P + m_U \Delta x_U \dot{\beta}_p^{\,2};$$
$$m_U \ddot{Y}_K + m_U \Delta x_U \ddot{\beta}_p = F_2\sin\varphi_{BK} + F_3\sin\varphi_{ED} + F_0\sin\varphi_{QG} - m_U g + m_U \Delta y_U \dot{\beta}_p^{\,2};$$
$$J_U \ddot{\beta}_p = M_U - M_{trU}$$

Введя обозначения $\varepsilon_T = \dfrac{M_T - M_{trT}}{J_T}$ и $\varepsilon_U = \dfrac{M_U - M_{trU}}{J_U}$, можем окончательно выразить систему независимых уравнений

$$\ddot{X}_S = \frac{F_1\cos\varphi_{AS} + F_3\cos\varphi_{DE} + m_T \Delta x_T \dot{\varphi}_p^{\,2} + m_T \Delta y_T \varepsilon_T}{m_T};$$

$$\ddot{Y}_S = \frac{F_1\sin\varphi_{AS} + F_3\sin\varphi_{DE} - m_T g + m_T \Delta y_T \dot{\varphi}_p^{\,2} - m_T \Delta x_T \varepsilon_T}{m_T};$$

$$\ddot{\varphi}_p = \frac{M_T - M_{trT}}{J_T}; \quad (23)$$

$$\ddot{X}_K = \frac{F_2\cos\varphi_{BK} + F_3\cos\varphi_{ED} + F_0\cos\varphi_{QG} + P + m_U \Delta x_U \dot{\beta}_p^{\,2} + m_U \Delta y_U \varepsilon_U}{m_U};$$

$$\ddot{Y}_K = \frac{F_2\sin\varphi_{BK} + F_3\sin\varphi_{ED} + F_0\sin\varphi_{QG} - m_U g + m_U \Delta y_U \dot{\beta}_p^{\,2} - m_U \Delta x_U \varepsilon_U}{m_U}$$

$$\ddot{\beta}_p = \frac{M_U - M_{trU}}{J_U}.$$

Движение механизма начинается из состояния покоя, т.е. в начальный момент времени выполняются соотношения

$$t = 0 \quad \dot{X}_S = 0 \;\; \dot{Y}_S = 0 \;\; \dot{X}_K = 0 \;\; \dot{Y}_K = 0 \;\; \dot{\varphi}_p = 0; \;\; \ddot{X}_S = 0 \;\; \ddot{Y}_S = 0 \;\; \ddot{X}_K = 0 \;\; \ddot{Y}_K = 0 \;\; \ddot{\varphi}_p = 0 \quad (24)$$
$$M = 0; \; P = 0; \; \dot{\beta}_p = 0; \; \ddot{\beta}_p = 0,$$

Далее из (23) с учетом (24) получаем систему трансцендентных уравнений для нахождения начальных значений обобщенных координат

$$F_1\cos\varphi_{AS} + F_3\cos\varphi_{DE} = 0; \quad F_1\sin\varphi_{AS} + F_3\sin\varphi_{DE} - m_T g = 0; \; M_T - M_{predT} = 0, \quad (25)$$

$$F_2\cos\varphi_{BK} + F_3\cos\varphi_{ED} + F_0\cos\varphi_{QG} = 0;\ F_2\sin\varphi_{BK} + F_3\sin\varphi_{ED} + F_0\sin\varphi_{QG} - m_U g = 0;$$
$$M_U - M_{predU} = 0.$$

Выводы. Полученная система уравнений (23) с начальными условиями (24) и (25) образуют классическую детерминированную задачу Коши, решение которой может быть выполнено стандартными вычислительными методами.

Список литературы

1. Горожанкин В.Н., Семеноженков В.С. Обоснование и построение кинематики грейферного перекладчика горячештамповочного комплекса // Труды МВТУ «Машины и технология обработки металлов давлением» №441. М., 1985. С. 89-94.

2. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. Л.: Машиностроение, 1990. 309с.

3. Федоринин Н.И. Рационализация характеристик конструкций цикловых устройств на основе анализа параметров нелинейных колебаний элементов: Автореф. дисс. канд. техн. наук. М., 2000.

4. Ачкасов А.Т., Семеноженков В.С. Расчет циклограммы горячештамповочного автомата с автономной грейферной подачей // «Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении» / Межвузовский сборник научных трудов. Воронеж, 1996. Вып.1. С. 122-131.

Федоринин Николай Иванович, канд. техн. наук, доцент, n_fedorinin@mail.ru, Россия, Воронеж, Филиал Ростовского государственного технического университета в г. Воронеж

DYNAMIC MODEL OF A CAM ROCKER MECHANISM

N.I. Fedorinin

A discrete mathematical model of a flat cam rocker mechanism is proposed in the article. It is assumed that the links of the mechanism are absolutely rigid bodies, and their elastic-dissipative properties are reduced to inertia-free couplings conjugating these bodies. The piecewise linear dependence of the tension-compression deformations of the couplings on the acting loads is accepted, due to the presence of gaps in the conjugations of the links. Dry friction in the conjugated links is taken into account. A system of differential equations modelling the movement of the mechanism is obtained.

Key words: cam mechanism, elastic-dissipative couplings, discrete mathematical model, gaps, dry friction, kinematic closure.

Fedorinin Nikolay Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, n_fedorinin@mail.ru, Russia, Voronezh Branch of Rostov State Transport University

УДК 621.01
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-619-620

ИССЛЕДОВАНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ 5R МЕХАНИЗМА СФЕРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

М.Р. Фаизов, Ф.Ф. Хабибуллин, Л.Ф. Хабибуллина

В статье представлен пятизвенный пространственный шарнирный механизм со сферическими звеньями с двойной степенью свободы. Звенья механизма совершают перемещение и вращение по сферическим траекториям в пространстве. Для исследования проектируется структурная схема механизма. На структурной схеме обозначаются все важные параметры углов, вершин и осей. Каждое звено имеет числовое обозначение. Шарниры механизма обозначаются заглавными латинскими буквами. Параметры движения механизма определяются тригонометрическими уравнениями. Для расчета используются все параметры реалистичного механизма. Математическая модель расчета момента инерции производиться для вывода исследования ведомых звеньев механизма от ведущих звеньев. При расчете инерции учитываются более 10 углов вращения всего механизма. Результаты исследования движения инерции звеньев выводятся на пространственные графики. По графикам определяется возможность реализации данной технологии. Результаты исследования графиков демонстрируют цельность графиков. По графикам видно похожесть числовых результатов, свидетельствующих об правильном расчете математической модели. В заключении моделируется структурная схема нового устройства в качестве применения и его виртуальная модель спроектированная в программе solidworks.

Ключевые слова: пятизвенный механизм, две степени свободы, момент инерции, сферический механизм.

Известно, что пятизвенные механизмы с двумя степенями свободы получаются присоединением двойной шарнирной группы Ассура к простейшему трехзвенному шарнирному механизму [1-2]. С помощью пятизвенных механизмов с двумя степенями свободы можно осуществить значительно больше разновидностей преобразования и воспроизведения траектории, чем с четырьмя звеньями механизмами [3-4]. Это свойство пятизвенных механизмов широко используется при выполнении разнообразных технологических процессов [5-7]. В отличие от четырехзвенных механизмов с помощью пятизвенного механизма в процессе их работы можно изменить траекторию движения шатунной точки от простой до сложной за счет изменения угловых скоростей входных ведущих звеньев и их взаимного начального расположения при неизменных длинах звеньев [8-10]. Эти обстоятельства прямо связаны с выбором длин выходных звеньев механизма и предопределяют необходимые условия создания компактных легковесных механизмов, особенно в космической и робототехнической областях промышленности [11-13].

Момент инерции пятизвенного сферического механизма с двумя степенями свободы. Для ведомых звеньев 3 и 4 пятизвенного механизма значения инерции I_{P_1} и I_{P_2} будет выражено по формулам 1 и 2 где также расписаны углы вращения всех звеньев по пространственным перемещениям **[14-17]**:

$$I_{P_1} = \frac{m_3 p^2}{2}\left[\left(1-\frac{2\sin\alpha_3}{\alpha_3}\right)\left(\cos\frac{\alpha_3}{2}\cos P_1C - \sin\frac{\alpha_3}{2}\sin P_1C\cos\mu\right)^2 + \right.$$
$$\left. + \left(1+\frac{\sin\alpha_3}{\alpha_3}\right)\left(\frac{\cos\frac{\alpha_3}{2}\cos\tilde{\alpha} - \cos P_1C}{\sin\frac{\alpha_3}{2}}\right)^2 + 2\sin^2\tilde{\alpha}\right] \quad (1)$$

$$I_{P_3} = \frac{m_4 p^2}{2}\left[\left(1-\frac{2\sin\alpha_4}{\alpha_4}\right)\left(\cos\frac{\alpha_4}{2}P_2D - \sin\frac{\alpha_4}{2}\sin P_2D\cos\psi\right)^2 + \left(1+\frac{\sin\alpha_4}{\alpha_4}\right)\left(\frac{\cos\frac{\alpha_4}{2}\cos\tilde{\tilde{\alpha}} - \cos P_2D}{\sin\frac{\alpha_4}{2}}\right) + 2\sin^2\tilde{\tilde{\alpha}}\right] \quad (2)$$

где

$$ctgP_1B = -\frac{\sin\gamma ctg\psi + \cos\gamma\cos\alpha_3}{\sin\alpha_3},$$

$$\sin P_1C = \frac{\sin P_1B\sin\gamma}{\sin\mu};$$

$$ctgP_2C = -\frac{\sin\mu ctg\psi + \cos\mu\cos\alpha_4}{\sin\alpha_4},$$

$$\sin P_2D = \frac{\sin P_2C\sin\mu}{\sin\psi};$$

$$\cos\mu = \frac{\cos l - \cos\alpha_3\cos\alpha_4}{\sin\alpha_3\sin\alpha_4};$$

$$\cos\tilde{\alpha} = \cos\frac{\alpha_3}{2}\cos P_1C - \sin\frac{\alpha_3}{2}\sin P_1C\cos\mu;$$

$$\cos\tilde{\beta} = \left(\cos\frac{\alpha_3}{2}\cos\tilde{\alpha} - \sin\tilde{\alpha}\cos P_1C\right)\left(\sin\frac{\alpha_3}{2}\sin\tilde{\alpha}\right)^{-1};$$

$$\cos\tilde{\gamma} = -\sin\tilde{\alpha} = -\left[1-\left(\cos\frac{\alpha_3}{2}\cos P_1C - \sin\frac{\alpha_3}{2}\sin P_1C\cos\mu\right)^2\right]^{1/2};$$

$$\cos\tilde{\tilde{\alpha}} = \cos\frac{\alpha_4}{2}\cos P_2D - \sin\frac{\alpha_4}{2}\sin P_2D\cos\psi;$$

$$\cos\tilde{\tilde{\beta}} = \left(\cos\frac{\alpha_4}{2}\cos\tilde{\tilde{\alpha}} - \sin\tilde{\tilde{\alpha}}\cos P_2D\right)\left(\sin\frac{\alpha_4}{2}\sin\tilde{\tilde{\alpha}}\right)^{-1};$$

$$\cos\tilde{\tilde{\gamma}} = -\sin\tilde{\tilde{\alpha}} = -\left[1-\left(\cos\frac{\alpha_4}{2}\cos P_2D - \sin\frac{\alpha_4}{2}\sin P_2D\cos\psi\right)^2\right]^{1/2}.$$

Для расчета данного момента инерции все-таки следует определить параметры данных кинематики сферического пятизвенного механизма (γ, ψ, μ) определяются из кинематики механизма. Данные исследования присутствуют в публикациях главного автора статьи. Также углы и их данные следует применять при расчетах в программе Maple 17 [17].

Полученные моменты инерции I_{P_1} и I_{P_2} являются переменными величинами относительно произвольно расположенных мгновенных осей Op_1 и Op_2 соответственно [18-20].

Таким образом, зная моменты инерции для звеньев сферических механизмов, совершающих на поверхности сферы сложное движение, кинетическую энергию можно представить:

$$T = \frac{I_p\omega^2}{2}, \quad (3)$$

где I_P- момент инерции звена относительно оси, проходящей через мгновенный центр вращения P; ω - мгновенная угловая скорость звена.

Момент инерции I_P относительно оси, проходящей через мгновенный центр вращения, может быть выражен через момент инерции I_{S3} , относительно оси, проходящей через центр масс S звена при условии, что это звено большой толщины

$$I_p = I_{S_3} + m_3(\rho\cos PS_3)^2, \quad (4)$$

где

$$PS_3 = \arccos(\cos AP \cos AS_3 - \sin AP \sin AS_3 \cos\gamma_0). \tag{5}$$

Кроме того, Формула примет вид:

$$T = \frac{I_s \omega^2}{2} + \frac{V_{S_3}^2 m_3}{2} \tag{6}$$

Полученные моменты инерции (I_{P_1}, I_{P_2}) являются переменными величинами относительно произвольно расположенных мгновенных осей OP и OP_2 соответственно. На рисунке 1 представлены все углы, обозначения ведущих и ведомых углов вращения, проекционные углы сферического пятизвенного механизма.

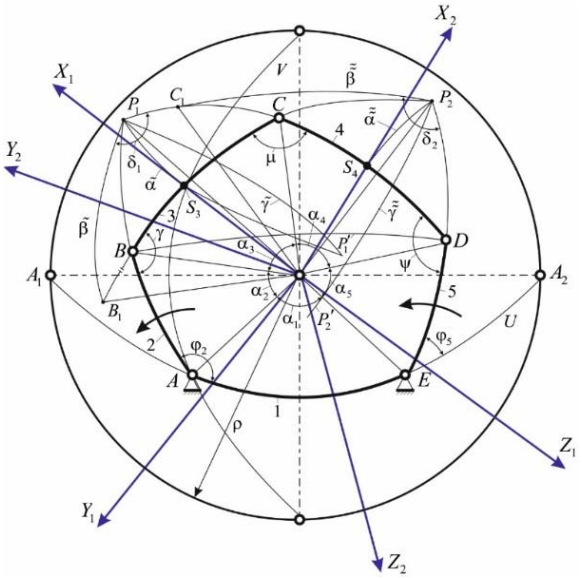


Рис. 1 Схема механизма

Анализ полученных формул. На рисунке 2 представлены графики моментов инерции ведомых звеньев 3 и 4 сферического пятизвенного механизма. При вычислениях данных графиков использовалось две переменные изменяющие свое значение в промежутке времени. При вычислении данных графиков, две изменяющие переменные выполняют одно общее движение в настоящей момент времени, то есть вместе, но каждый отдельный график показывает результат момента инерции поведения определенного ведомого звена.

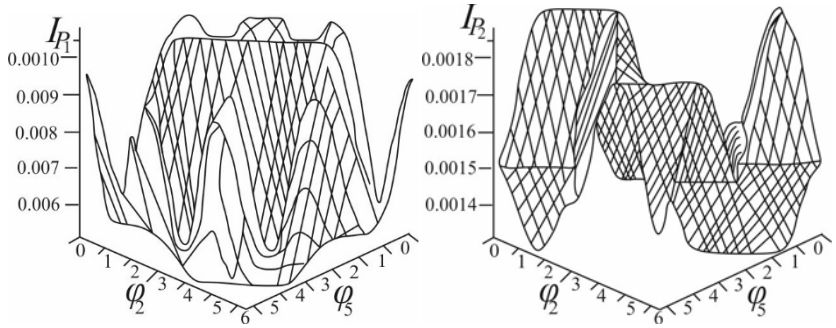


Рис. 2. График моментов инерции

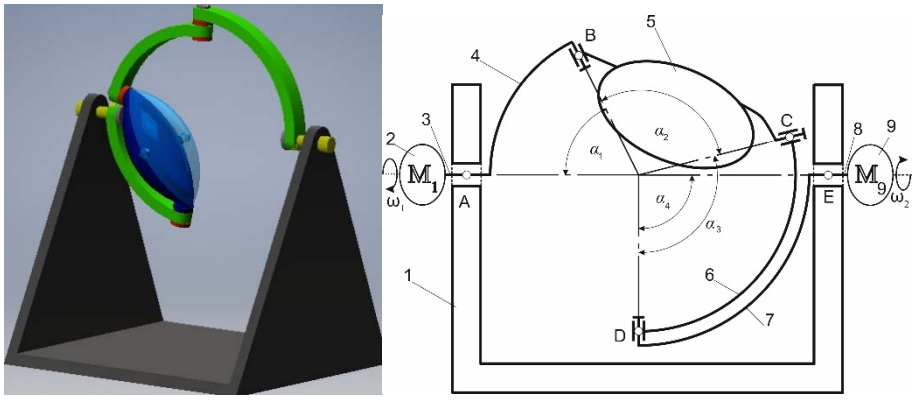


Рис 3 Модель АЭРОТРЕНАЖЕРА

На рисунке 2 представлена 3D модель и структурная схема тренажера с фиксацией по двум осям. По причине будущих исследований данный тренажер будет выдерживать повышенные угловые скорости, а также будет проще сбалансировать установку в будущем по сравнению с одной осью фиксации по инженерным соображениям.

Заключение. Проведено исследование пятизвенного механизма с двумя степенями свободы на момент инерции вращения заданных параметров. Через тригонометрические формулы с добавлением массы получены графики моментов инерции ведомых звеньев. На основе данного механизма смоделирован тренажер.

Список литературы

1. Кесель Л. Г. Влияние деформации плоского зеркала коаксиального лазера на характеристики выходного излучения // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 15–20.

2. Батищева К. А., Вымпина Ю. Н. Влияние способа обработки алюминиево-магниевого сплава на структуру кольцевых осадков, формирующихся при испарении капель коллоидных растворов // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 31–33.

3. Ефремова Е. С., Мифтахов Б. И., Солдаткина К. В. Имитационное моделирование неподвижного приемника вихревой системы воздушных сигналов // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева 2021. Т. 77, № 1. С. 102–108.

4. Иванов В. К. К задаче аналитического проектирования мехатронных систем // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева 202. Т. 77, № 1. С. 67–70.

5. Валиуллина Д. М., Козлов В. К., Садыков Э. М. Исследование корреляций между характеристиками трансформаторного масла // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 62–66.

6. Валиев А. И., Курылев Д. В. Экспериментальная установка для исследования процесса электрохимической обработки кромок профиля пера лопаток газотурбинного двигателя // Вестник Казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 57–61.

7. Кесель Б. А., Кесель Л. Г. Энергоэффективность мобильной газотурбинной электростанции малой мощности для электроснабжения буровой // Вестник казанского технического университета им. А. Н. Туполева. 2021. Т. 77, № 1. С. 71–75.

8. Муратаев Ф. И., Евлампьев А. В., Муратаев Т. А. Анализ причин развития стресс коррозии аустенитных сталей и сварных соединений // Вестник казанского технического университета им. А. Н. Туполева.
2021. Т. 77, № 1. С. 76–81.

9. Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овально-траншейными вихрегенераторами / А. А. Миронов, С. А. Исаев, А. Н. Скрыпник, И. А. Попов, Ю. Ф. Гортышев // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12, № 9. С. 386–402.

10. Фаизов М. Р., Мудров А. П. Исследование движения сферического тренажера // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 1. С. 182–191.

11. Skrypnik A.N., Shcelchkov A.V., Gortyshov Yu.F., Popov I.A. Artifician neural networks application on friction factor and heat transfer coefficients prediction in tubes with inner helical-finning. Applied Thermal Engineering, 2022, vol. 206, p. 118049.

12. Рощин В. В., Хабибуллин Ф. Ф., Ерахмадов С. Н. К оценке температурного состояния шарикоподшипников опор гтд повышенной теплонапряженности // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2019. Т. 75, № 3. С. 66–69.

13. Моделирование динамики двухфазного потока в сепараторе / И. М. Баянов, Ю. Ф. Гортышов, В. Г. Тонконог, М. И. Тонконог // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2013. № 4. С. 34–42.

14. Lustin A.D., Egorov S.V. Defining relation of vibration of vehicle suspension with the mass and rigidity design deviations. International Journal of Applied Engineering Research, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 44629- 44635.

15. Мудров П. Г. Пространственные механизмы с вращательными парами / Казанский сельскохозяйственный институт имени М. Горького, 1976.

16. Конструктивное моделирование процессов синтеза: монография В. А. Райхлин, И. С. Вершинин, Р. К. Классен, Р. Ф. Гибадуллин, С. В. Пыстогов. Казань: Фэн, 2020. 248 с.

17. Вершинин, И. С. Методы, модели и алгоритмы конструктивной теории ассоциативной стегозащиты картографической и текстовой информации / И. С. Вершинин // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 3. – С. 108-115. – DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_3_108. – EDN LBOEZP.

18. Snegurenko A.P., Zaydullin S.S., Novikova S.V., Valitova N.L., Kremleva E.S. Technology of multilevel interuniversity indicators as a factor for increasing academic mobility. Experience based on russian federal educational standards. Integration of Education, 2022, vol. 26, no. 1 (106), pp. 55-71.

19. Ассоциативная стеганография текстовых сообщений / И. С. Вешинин, Р. Ф. Гибадуллин, С. В. Пыстогов, В. А. Райхлин // Вестник московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2021. № 1. С. 3–14.

20. Pikuleva, N. I. Querying big graphs in data flow language / N. I. Pikuleva, A. S. Khafizova, D. A. Gashigullin // Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. Sochi, 2021. P. 455-460. DOI 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446339. EDN YVZNIN.

Хабибуллин Фаниль Фаргатович, канд. техн. наук, доцент, fanil_arsk@mail.ru , Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,

Фаизов Марат Рауфович, аспирант, faizovmarat92@gmail.com, Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,

Хабибуллина Лейсан Фаритовна, инженер, fanil_arsk@mail.ru, Россия, Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

STUDY OF THE MOMENT OF INERTIA 5R
OF A SPHERICAL STRUCTURE MECHANISM WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

M.R. Faizov, F.F. Khabibullin, L.F. Khabibullin

The article presents a five-link spatial hinge mechanism with spherical links with a double degree of freedom. The links of the mechanism move and rotate along spherical trajectories in space. For the study, a block diagram of the mechanism is designed. The block diagram indicates all the important parameters of angles, vertices and axes. Each link has a numerical designation. The hinges of the mechanism are indicated in capital Latin letters. The movement parameters of the mechanism are determined by trigonometric equations. All parameters of a realistic mechanism are used for calculations. A mathematical model for calculating the moment of inertia is carried out to derive the study of the driven links of the mechanism from the driving links. When calculating inertia, more than 10 rotation angles of the entire mechanism are taken into account. The results of the study of the movement of inertia of the links are displayed on spatial graphs. The graphs determine the feasibility of implementing this technology. The results of the graph examination demonstrate the integrity of the graphs. The graphs show the similarity of the numerical results, indicating the correct calculation of the mathematical model. In conclusion, the block diagram of the new device is simulated as an application and its virtual model designed in the solidworks program.

Key words: five-bar mechanism, two degrees of freedom, moment of inertia, spherical mechanism.

Khabibullin Fanil Fargatovich, candidate of technical sciences, docent, fanil_arsk@mail.ru, Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,

Fayzov Marat Raufovich, postgraduate, faizovmarat92@gmail.com, Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,

Khabibullina Leysan Faritovna, engineer, fanil_arsk@mail.ru, Russia, Kazan, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 622.276.53
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-624-625

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ СИСТЕМЫ ППД

Г.И. Бикбулатова, А.С. Галеев, Ю.А. Болтнева, П.А. Ларин, С.Р. Гилязова

Решена оптимизационная задача по закачке центробежным секционным насосом жидкости в пласт по двум направлениям, дана оценка повышения энергоэффективности работы насоса по закачке регламентированных объемов жидкости по направлениям.

Ключевые слова: трубопровод, насос, напор, подача, расход.

При разработке месторождений для обеспечения требуемого уровня добычи углеводородного сырья из скважин и увеличения нефтеотдачи продуктивных пластов используются различные методы поддержания пластового давления. Среди которых своей универсальностью выделяется метод заводнения, применимый практически при всех геолого-физических и технико-технологических условиях, и позволяющий получить наибольший конечный коэффициент нефтеотдачи.

Разнообразные технологические схемы систем поддержания пластового давления (ППД) нефтегазодобывающих предприятий для нагнетания воды в пласты-коллекторы в преобладающем большинстве используют центробежные секционные насосы (ЦНС), в качестве привода которых выступают синхронные двигатели типа СТД или асинхронные типа АРМ мощностью до 5 МВт. При этом удельное потребление электроэнергии оборудованием кустовых насосных станций (КНС) достигает в некоторых случаях 80% от потребления всей технологической системы ППД [1-2]. Учитывая значительный процент обводненности скважинной продукции, высокую стоимость электроэнергии и тенденцию к ее увеличению, снижение энергозатрат является ключевой задачей в повышении эффективности систем ППД, определяет необходимость поиска направлений совершенствования основных энергопотребляющих процессов и установления оптимальных режимов работы насосного оборудования.

Критерием энергоэффективности системы служит удельный расход электроэнергии, показывающий энергоёмкость комплекса оборудования КНС на закачку жидкости при плановых показателях затрат. Известно, что на указанный параметр оказывают влияние КПД насосных агрегатов и характеристики трубопроводной сети [3-6].

Количество затрачиваемой энергии зависит так же от положений задвижек, установленных на линиях, поскольку это влияет на положение рабочей точки на напорной характеристике насоса, и соответственно на расход жидкости и коэффициент полезного действия насоса.

Наиболее широко применяемые варианты закачки:

насос одновременно работает на все направления заводнения, отключая трубопроводы задвижкой по мере выполнения плана;

закачка по направлениям осуществляется поочередно по каждому отдельному трубопроводу, т.е. в любой момент времени задействована только одна линия;

насос работает поочередно на одну из групп трубопроводов, которые разделены на множество направлений.

Восполнение и поддержание пластового давления через систему нагнетательных скважин обеспечивает приближение к добывающим скважинам зоны повышенного давления. Обычно кустовые насосные станции работают на несколько площадей, достаточно удаленных друг от друга, к каждой из которых ведет отдельная линия (направление). Количество перекачиваемой жидкости обычно регламентируется по каждому направлению, т.е. на любое из направлений указывается конкретный (плановый) объем необходимой закачки.

Будем считать, что характеристика направлений постоянна и не зависит от времени, как и напорная характеристика насоса. С целью упрощения задачи ограничимся рассмотрением всего двух направлений.

Через первый и второй трубопроводы требуется закачать объёмы V_1 и V_2 соответственно, затратив наименьшее количество энергии (рис. 1). Каждая линия оборудована задвижкой и расходомером, для регулирования и контроля объемов перекачиваемой жидкости.

Гидравлические характеристики насоса обычно задаются в виде зависимостей напора (h) и к.п.д. (η) от расхода (q). В этом исследовании удобнее работать с величинами, зависящими не от расхода, а от напора. Поэтому подачу и КПД насоса представим следующими функциями [7]

$$q = q(h),\ \eta = \eta(h),$$

а потоки в трубопроводах – функциями

$$q_1 = q_1(h),\ q_2 = q_2(h).$$

Гидравлическая характеристика коллектора (q_k) зависит от характеристики каждого направления и степени открытия задвижек

$$q_k(H) = aq_1(H) + bq_2(H),$$

где *a* и *b* – коэффициенты, характеризующие степень открытости трубопроводов (или степень свободы потоков) в интервале от 0 (полное перекрытие трубопровода) до 1 (полное открытие трубопровода).

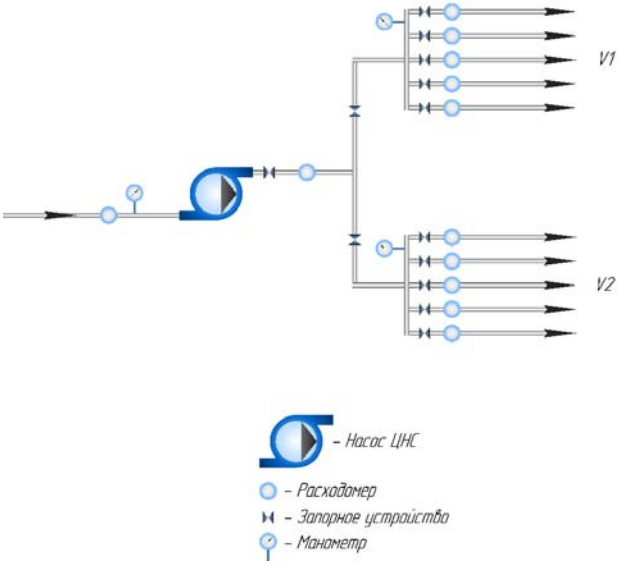


Рис. 1. Схема насосной станции

Рабочая точка системы насос – коллектор (*Q, H*) определяется уравнением

$$q(h) = aq_1(h) + bq_2(h). \quad (1)$$

Процесс заполнения объёмов V_1 и V_2 изобразим линией, которую назовём линией заполнения (рис. 2). Точка *M (x, y)* изображает момент, когда через первый трубопровод поступил объём *x* через второй – объём *y*

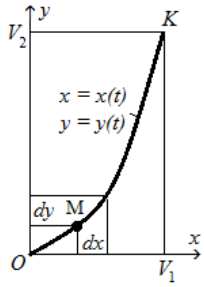


Рис. 2. Линия заполнения

Возьмём произвольную линию заполнения *OK,* описываемую уравнениями $x = x(t)$, $y = y(t)$, где t текущее время (рис.2). На линии *OK* выделим элемент *dx, dy,* отвечающий бесконечно малому отрезку времени *dt*.

Объемы, прошедшие через трубопроводы, составят

$$dx = aq_1(H)dt,\ dy = bq_2(H)dt.$$

Тогда

$$\dot{x} \equiv \frac{dx}{dt} = aq_1(H),\ \dot{y} \equiv \frac{dy}{dt} = bq_2(H).$$

Формула (1) запишется в виде

$$Q(H) = \dot{x} + \dot{y}.$$

За время *dt* насос потребляет энергию

$$dE = \rho g \frac{H}{\eta(H)} Q(H)dt. \quad (2)$$

Поскольку *H и Q* зависят от $\dot{x} + \dot{y}$, то энергию можно выразить как некую функцию от $\dot{x} + \dot{y}$,

$$dE = F(\dot{x} + \dot{y})dt, \text{ где } F(\dot{x} + \dot{y}) = \rho g \frac{H}{\eta(H)} Q(H).$$

Тогда

$$E = \int_0^\tau F(\dot{x} + \dot{y})dt,$$

где *T* – общее время заполнения двух объёмов, а функции $x(t),\ y(t)$ должны удовлетворять граничным условиям

$$x(0) = 0, \quad y(0) = 0, \quad x(T) = V_1, \quad y(T) = V_2. \quad (3)$$

Экстремаль определяется уравнениями Эйлера [8]

$$\frac{d}{dt}F_{\dot{x}} - F_x = 0. \quad \frac{d}{dt}F_{\dot{y}} - F_y = 0.$$

Так как функция *F* не зависит от *x* и *y* получим

$$F_{\dot{x}\dot{x}}\ddot{x} = 0. \quad F_{\dot{y}\dot{y}}\ddot{y} = 0.$$

Поскольку в общем случае $F_{\dot{x}\dot{x}} \neq 0$, $F_{\dot{y}\dot{y}} \neq 0$, то, во-первых,

$$\ddot{x} = 0, \quad \ddot{y} = 0, \quad \dot{x} = Q_1 = const1, \quad \dot{y} = Q_2 = const2\ , \quad (4)$$

во-вторых, искомая экстремаль не имеет изломов [8].

Из условия постоянства расходов (4) следует, что *объемы должны заполниться одновременно*. Иначе говоря, линией заполнения должен быть отрезок прямой *OK*.

Для снижения потребляемой энергии (2) необходимо вести закачку с минимальным значением величины $H/\eta(H)$. Эта величина для насосов ЦНС будет минимальной при наименьшем напоре H [3]. Управлять напором можно только путем регулирования потока задвижками, т. е. изменяя коэффициенты *a, b.* Из граничных условий (3) следует

$$bq_2(H) : aq_1(H) = V_2 : V_1. \quad (5)$$

Рассмотрим случай, когда коэффициенты *a и b одновременно меньше единицы*.

Будем увеличивать коэффициенты *a и b,* так чтобы соотношение (5) не нарушалось, при этом напор будет падать. Одна из величин a и b первой достигнет максимального значения, равного 1. Напор H будет при этом минимальным, как и затраты энергии (2).

Соответственно, необходимо, чтобы *в любой момент заполнения хотя бы один трубопровод был полностью открыт, т.е. среди коэффициентов a, b хотя бы один равен* 1.

Таким образом, резюмируя все вышеизложенное можно сделать вывод, что с целью обеспечения наиболее экономичного режима работы центробежных насосов системы ППД необходимо отрегулировать потоки жидкости таким образом, чтобы закачка осуществлялась по обоим направлениям и завершилась одновременно. При этом, по крайней мере, один из трубопроводов должен быть полностью открыт, а закачка по второму направлению должна быть ограничена. Осуществить ограничение можно двумя способами: либо дросселированием при помощи задвижки, что может привести к ее ускоренному износу, либо ограничением числа открытых скважин в соответствующем направлении.

Список литературы

1. Инструкция по обследованию системы ППД с целью повышения эффективности её эксплуатации:РД 153-39.0-651-09: утв. ОАО «Татнефть»: ввод в действие с 01.01.09. Бугульма: ТатНИПИнефть, 2009. 137 с.
2. Багманов А.А. Насосы центробежные системы ППД нефтяных месторождений. Исследование. Проектирование. Эксплуатация. KG Gemany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. 2012. 108 с.
3. К проблеме повышения эффективности работы насосных агрегатов / Галеев А.С., Сулейманов Р.Н., Бикбулатова Г.И. // Технологии топливно-энергетического комплекса. 2005. № 2. С. 92-97.
4. Сулейманов Р.Н. Эффективность работы насосных агрегатов [Текст]: монография / Р.Н. Сулейманов, А.С. Галеев, Г.И. Бикбулатова. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. 100 с.
5. Ибрагимов Н.Г. Оценка энергетических потерь, возникающих при неконтролируемой закачке воды в пласт через систему поддержания пластового давления / Н.Г. Ибрагимов, В.Г. Фадеев, Г.А. Федотов, М.Ш. Каюмов, И.В. Владимиров // Нефтепромысловое дело. 2003. № 12. С. 28-31.
6. Колосов Б. Методика снижения энергоемкости процесса нагнетания в системе ППД и необходимое оборудование / Б. Колосов, Р. Сулейманов // Нефтесервис. 2006. № 3. С. 27-29.
7. Бикбулатова Г.И., Галеев А.С., Болтнева Ю.А., Ларин П.А., Сулейманов Р.Н., Филимонов О.В. Оптимизация процесса закачки фиксированных объемов жидкости в два направления. Инжиниринг георесурсов. // Известия Томского политехнического университета. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. Т. 330. № 1. С. 134-144.
8. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1969. 425 с.

Бикбулатова Голия Ильдусовна, канд. техн. наук, доцент, agni-ngo@mail.ru, Россия, Республика Татарстан, Альметьевск, Альметьевский государственный нефтяной институт,

Галеев Ахметсалим Сабирович, д-р техн. наук, профессор, Россия, Республика Татарстан, Альметьевск, Альметьевский государственный нефтяной институт,

Болтнева Юлия Анатольевна, старший преподаватель, boltneva1julia@mail.ru, Россия, Республика Татарстан, Альметьевск, Альметьевский государственный нефтяной институт,

Ларин Пётр Андреевич, старший преподаватель, larinpa@mail.ru, Россия, Республика Башкортостан, Уфимский государственный нефтяной техническмй университет в г. Октябрьском,

Гилязова Светлана Ришатовна, старший преподаватель, Россия, Республика Татарстан, Альметьевск, Альметьевский государственный нефтяной институт

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF PUMPING STATIONS OF THE MRP SYSTEM

G.I. Bikbulatova, A.S.Galeev, Yu.A. Boltneva, P.A. Larin, S.R. Gilyazova

The optimization problem of pumping liquid into the formation by a centrifugal sectional pump in two directions has been solved, and an assessment has been made of increasing the energy efficiency of the pump for pumping regulated volumes of liquid in directions.

Key words: pipeline, pump, head, supply, flow

Bikbulatova Goliya Ildusovna, candidate of technical sciences, docent, agni-ngo@mail.ru, Russia, Republic of Tatarstan, Almetyevsk, Almetyevsk State Petroleum Institute,

Galeev Akhmetsalim Sabirovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Republic of Tatarstan, Almetyevsk, Almetyevsk State Petroleum Institute,

Boltneva Yulia Anatolyevna, senior lecturer, boltneva1julia@mail.ru, Russia, Republic of Tatarstan, Almetyevsk, Almetyevsk State Petroleum Institute,

Larin Pyotr Andreevich, senior lecturer, larinpa@mail.ru, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa State Petroleum Technical University in Oktyabrsky,

Gilyazova Svetlana Rishatovna, senior lecturer, Russia, Republic of Tatarstan, Almetyevsk, Almetyevsk State Petroleum Institute

УДК 621.928.37
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-627-628

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПИРИТНЫХ ОГАРКОВ В ГИДРОЦИКЛОНАХ НАПОРНОГО ТИПА

С.Ю. Лозовая, Е.С. Бащева

В статье рассмотрена перспектива гидроклассификации материалов мелкой фракции (менее 60 мкм) в различных отраслях промышленности. Описана конструкция и принцип действия гидроциклонов напорного типа ГЦК-360-10 и модифицированного с разделительной областью в рабочей зоне, приведены их достоинства и недостатки. Представлена новая конструкция гидроциклона, позволяющая улавливать частицы подготовленных пиритных огарков размером менее 60 мкм. Описаны конструкция и принцип действия исследуемых устройств, созданы их цифровые модели для гидродинамического моделирования с использованием CAD/CAE – системы. Компьютерное моделирование актуально при разработке новых изделий, оно позволяет на ранних стадиях проектирования оценить функциональность и работоспособность будущего изделия, сравнить его эффективность с имеющимся оборудованием. Показано, что новая конструкция гидроциклона предоставляет возможность усовершенствования аппарата ГЦК-360-10, который используется на предприятиях различных отраслей промышленности. Установлено, что использование конструкции нового гидроциклона позволит сократить количество повторных подач в него, а также сократит количество повторных подач в мельницу для домола, что составит экономию электроэнергии в сотни млн. руб в год.

Ключевые слова: гидроклассификация, эффективность разделения частиц, проектирование, CAD/ CAE - система, энергоемкость.

Гидроциклоны [1,2] — это аппараты, которые широко используются в различных отраслях промышленности, например, в обогатительной, металлургической, цементной, химической промышленности и др. Они используются с целью классификации и обогащения в жидкой среде тонкоизмельченных материалов по скорости и направленности движения пульпы [3,4], для повышения качества и улучшения технических свойств готового продукта.

Гидроциклоны напорного типа имеют ряд преимуществ перед другими конструкциями [1, 5]: простота, компактность и дешевизна в изготовлении, надежность и удобство в эксплуатации, обладает высокой производительностью. Его можно применять как самостоятельный аппарат, либо объединенный в батареи в открытых или замкнутых циклах измельчения. Гидроциклоны напорного типа имеют существенный недостаток - отсутствие точной границы разделения частиц на фракции, что требует повторной подачи материала в гидроциклон для извлечения необходимой фракции готового продукта.

Обогащение при добыче полезных ископаемых очень энергоемкий и дорогостоящий процесс из-за больших потерь концентрата, добываемого минерала, при его извлечении из руды. Для снижения энергоемкости и повышения эффективности необходимо установить точную границу разделения частиц готового продукта. Предложено в используемых гидроциклонах напорного типа организовать разделительную область в тангенциальном притоке [6, 7], загружаемой пульпы, в которую будет подаваться вода, что даст возможность осадить крупный материал, при этом преобладающая часть мелких частиц останется в центральном потоке и будет выведена на верхний слив. Что предотвратит попадание частиц концентрата на нижний слив.

Высокую значимость при проектировании новых устройств имеет компьютерное моделирование, так как оно предоставляет возможность создать цифровые прототипы будущих изделий, провести анализ их функциональности, осуществить сравнительный анализ различных вариантов исполнения устройства, оценить их эффективность и надежность, что позволяет выбрать рациональное решение с учетом различных параметров. Компьютерное моделирование позволяет выявить потенциальные проблемы и дефекты в конструкции цифрового прототипа еще на ранних этапах проектирования, что позволяет существенно сократить затраты на доработки и исправления конструкции на последующих этапах разработки.

В качестве классифицируемого в гидроциклоне материала рассматривается пульпа, в состав которой входят измельченные пиритные огарки [6] – отходы производства серной кислоты. Они представляют собой мелкозернистый материал с влажностью около 20% с размером частиц менее 60 мкм для подготовки портландцементного клинкера [10 - 14].

В гидроциклон ГЦК-360-10 [1] пульпа подается через тангенциальный приток в цилиндрический сегмент, где под действием центробежной силы, частицы с размером менее 60 мкм остаются в центральном потоке и уходят на верхний слив, а частицы размером более 60 мкм уносятся к внутренним стенкам гидроциклона, и теряя скорость уходят на нижний слив через коническую часть. Недостатком гидроциклона ГЦК-360-10 [1, 5] является отсутствие точного разделения частиц на фракции, т. е. на верхний слив попадают частицы > 60 мкм, что требует дополнительной классификации, а на нижний уходит большое количество частиц < 60 мкм, которое вместе с крупными частицами уходит на домол [8, 9].

Предложено, для уменьшения содержания мелкозернистого материала в нижнем сливе циклона, в тангенциальный приток 4, 5, куда подается пульпа, добавить разделительную область 10 (рис. 1), которая создаст барьерный слой воды или другой текучей среды, которая даст возможность осадить крупнозернистый материал, а мелкозернистая фракция останется в изначальном потоке. Поток барьерной текучей среды 7 будет окружать, подаваемую пульпу в форме кольца. Что уменьшит в нижнем сливе или совсем отделит от крупной фракции содержание мелкозернистых частиц. Предполагается, что два потока должны течь далее, разделенными друг от друга. Конструкция разделительной области состоит из пластины, создающей возможность принимать 2 потока жидкости во входном патрубке гидроциклона, перфорированной цилиндрической части, позволяющей крупным частицам уходить за разделительную область, и конической части, за стенками которой находится поток пульпы с крупными частицами > 60 мкм. Отверстия в цилиндрической части осуществляют соединение между подаваемой пульпой и потоком барьерной жидкости, что уравнивает давления между барьерной средой и пульпой.

Для проведения анализа эффективности улавливания частиц необходимой фракции стандартным гидроциклоном и новым гидроциклоном целесообразно использование цифрового моделирования гидродинамических процессов, рассматриваемых аппаратов. В выборе программного обеспечения ключевым является комплексность предлагаемого решения. Такому требованию соответствует программный продукт – SolidWorks [10, 11], который позволяет спроектировать цифровую модель (CAD-система), а также произвести моделирование гидродинамического процесса (CAE-система), что дает возможность при внесении необходимых изменений в модель быстро проводить гидродинамическое моделирование.

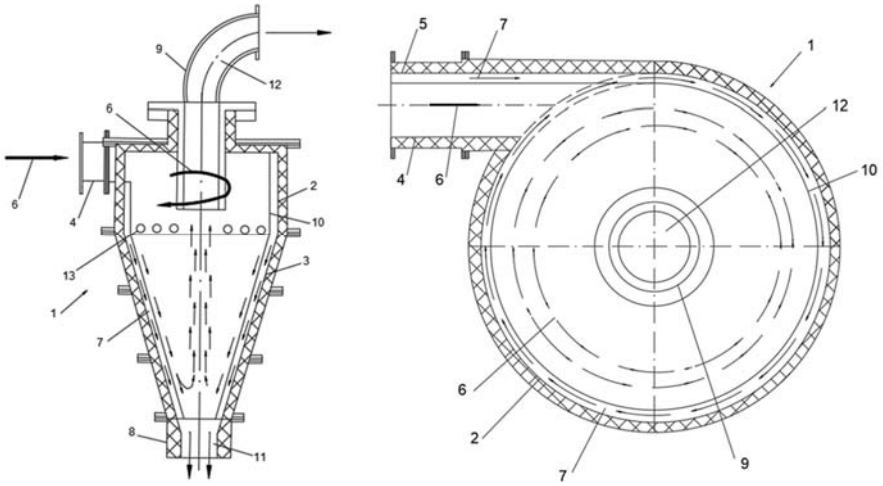


Рис. 1. Схема предлагаемого гидроциклона: 1 – гидроциклон; 2,3 – области притока и разделения; 4,5 – приток тангенциальный; 6 – пульпа; 7 – слой барьерной текучей среды; 8 – насадка нижнего слива; 9 – насадка верхнего слива; 10 – пластина; 11 – нижний слив; 12 – слив; 13 – отверстия

Для определения траекторий и скоростей потока пульпы первым этапом нужно построить цифровые модели нового гидроциклона с разделительной областью в рабочей зоне и ГЦК-360-10, затем необходимо проверить модели на зазоры и пересечения между деталями. Убедившись, что они отсутствуют можно перейти к моделированию потоков жидкости в гидроциклонах со следующими параметрами и граничными условиями [10, 11]:

- тип задачи - внутренняя – т. е. внутри полости агрегата;
- тип текучей среды - «Жидкость Ньютоновская», вязкость 2,3 сПз, плотность 1,5 кг/м^3;
- условия на стенках задаются, исходя из шероховатости футеровки (карбид кремния) 0,36 мкм;
- температура 25˚С;
- «Скорость на выходе» из гидроциклона 5 м/с;
- «Давление окружающей среды» 1 Атм;
- размер частиц 50–70 мкм;
- материал – пиритные огарки.

После проведения гидродинамического моделирования, были получены результаты для модели стандартного гидроциклона с представлением характера движения частиц (рис. 2) и в виде графика зависимости скорости частиц от их траекторий и удаления от нулевой точки (входной приток) (рис. 3) и для модели гидроциклона с разделительной областью (рис. 4, 5) соответственно.

Анализ характера движения частиц в рабочей области модели стандартного гидроциклона (рис. 2) показал, что частицы, поступающие через входной патрубок, попадают в цилиндрическую часть, где наблюдается большее их количество, после чего под действием центробежной силы более мелкие частицы движутся к центру и выходят через верхний слив, оставшиеся же частицы, теряя скорость попадают в коническую часть гидроциклона и затем выходят через нижний слив. Это соответствует теоретическому описанию, что подтверждает правильность заданных параметров и созданной модели.

Анализ траекторий частиц в модели стандартного гидроциклона показывает (рис. 3), что частицы, у которых скорости 8 м/с и более, потоком жидкой среды пульпы выносятся на верхний слив, не попадая в коническую часть гидроциклона. К таким относятся частицы 1, 2, 3 их траектории описывают поведение частиц, «мелкозернистой» фракции с размерами менее 60 мкм. Частицы скорость, которых менее 8 м/с попадают в коническую часть гидроциклона, постепенно теряют скорость (траектория частиц 4, 5, 6) (рис. 4) и уходят на нижний слив, что характерно для движения «крупнозернистой» фракции. Но траектория частицы 6 обрывается, что указывает на то, что эта частица относится к крупной фракции, т. е. она резко теряет скорость и уходит в нижний слив, а частицы 4 и 5 про-

должают свое перемещение по спирали в конической части гидроциклона, т. е. это, как правило, частицы с размером 60 и менее мкм, которые по той или иной причине попали в нижний слив и через него постепенно удаляются.

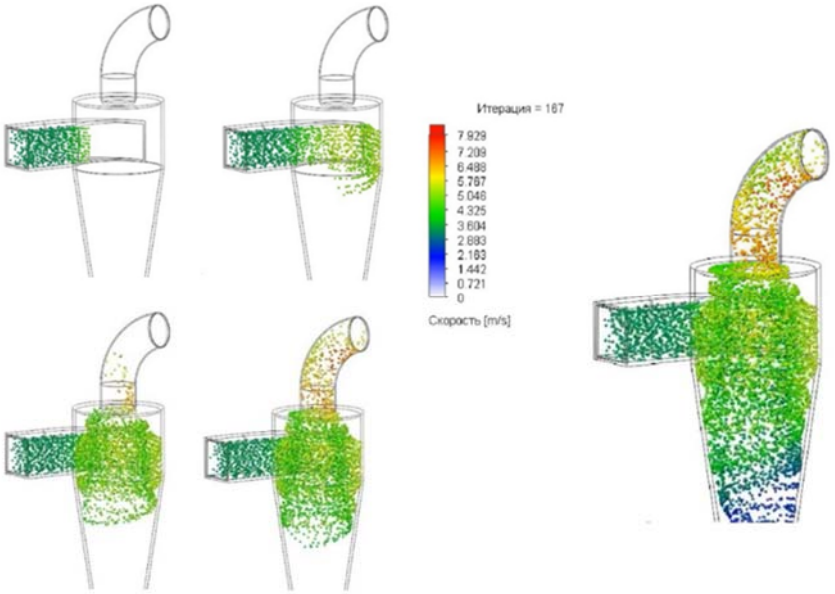


Рис. 2. Траектории движения частиц в стандартной модели гидроциклона

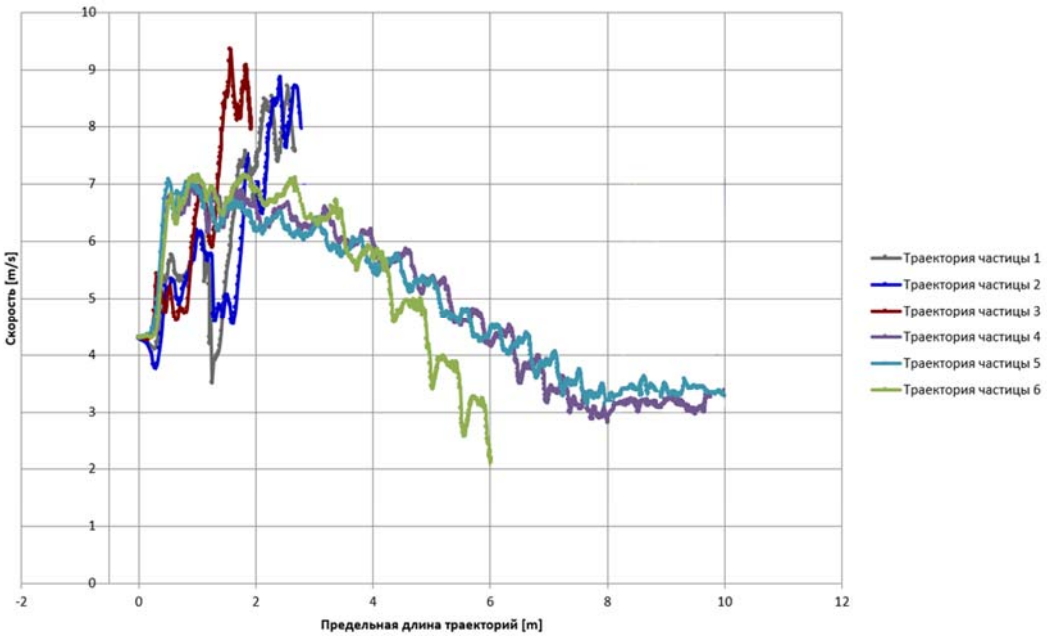


Рис. 3 График зависимости скорости частиц и их траектории от нулевой точки входа потока в цилиндрическую часть гидроциклона из входного патрубка в модели ГЦК-360-10

Анализ характера движения частиц в рабочей области модели нового гидроциклона (рис. 4) показал, что частицы, поступающие через входной патрубок, попадают в цилиндрическую часть, после чего под действием центробежной силы более мелкие частицы движутся к центру и выходят через верхний слив, оставшиеся частицы попадают в коническую часть, где частицы размером > 60 мкм постепенно теряют скорость и уходят на нижний слив, а частицы с размером < 60 мкм стремительно теряют скорость и затем набирая ее, образуют направленный вверх водоворот из нижней части конуса.

Анализ траекторий частиц в гидроциклоне новой конструкции показывает (рис. 5), что частицы, у которых скорости примерно 8 м/с и более, потоком пульпы выносятся на верхний слив, не попадая в коническую часть гидроциклона. К таким относятся частицы 1, 2, 3, их траектории описывают поведение частиц «мелкозернистой» фракции с размерами менее 60 мкм. Частицы скорость, которых менее 8 м/с попадают в коническую часть гидроциклона и здесь возможны 2 варианта. Первый вариант: частицы постепенно теряют скорость (траектория частицы 4) (рис. 5) и уходят на нижний слив - характер движения соответствует «крупнозернистой» фракции. Второй вариант: частицы: 5 и 6 (рис. 5) резко теряют скорость и в нижней части конуса стремительно набирают ее при скорости чуть более 6 м/с (рис. 4, 5), образуя направленный вверх водоворот (рис. 4), т. е. частицы «мелкозернистой» фракции (<60 мкм) уходят в цилиндрическую часть, оставаясь в центральном потоке и выводятся на верхний слив, не выходя за разделительную область. Это можно объяснить тем, что за счет омывания стенок разделительной области водой,

скорость которой выше скорости пульпы, частицы крупной фракции быстро попадают на нижний слив за счет того, что плотность воды гораздо меньше плотности пульпы, из-за чего в нижней части конуса создается разрежение, и поэтому организуется водоворот частиц размером < 60 мкм вверх. При том, что они при скорости чуть более 6 м/с попадают на верхний слив, на что показывает окончание их траектории (рис. 5).

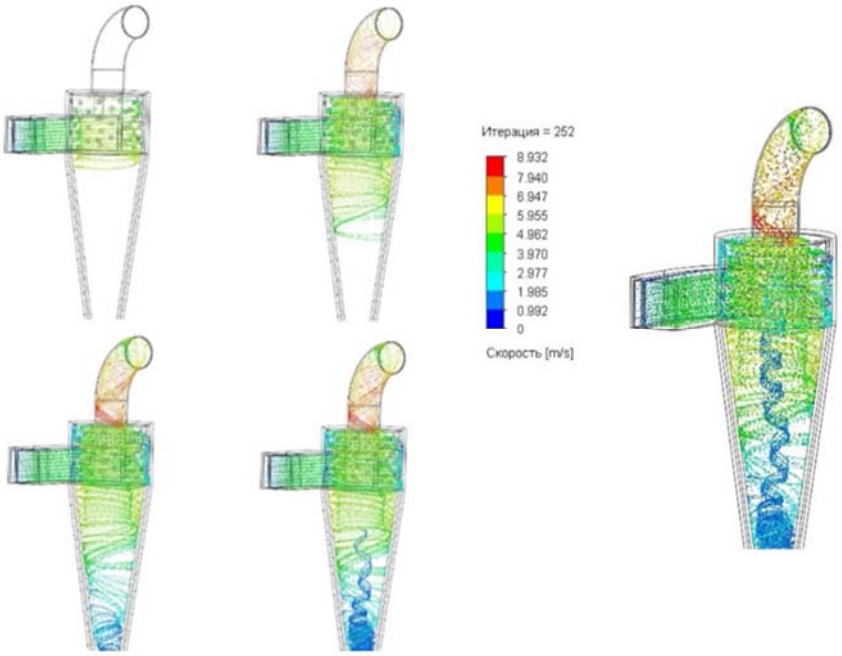


Рис. 4. Траектории движения частиц в модели гидроциклона с разделительной областью

При гидродинамическом расчете программным продуктом рассчитаны все возможные траектории частиц, при этом получен результат, что лишь 0,001 % мелких частиц попадают на нижний слив, что указывает эффективность работы модели напорного гидроциклона с разделительной областью в рабочей зоне в сравнении с эффективностью работы модели стандартного гидроциклона на нижний слив уходит 10–15% частиц < 60 мкм, что влечет за собой увеличение количества материала в нижнем сливе, что увеличивает количество возвратов на домол в мельницу.

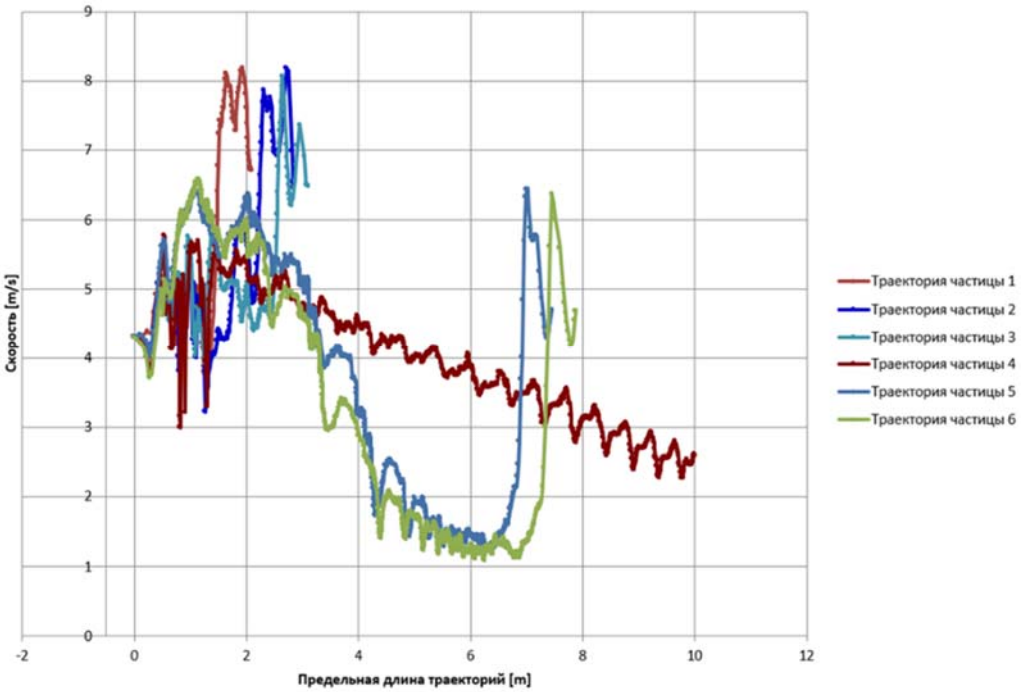


Рис. 5. График зависимости скорости частиц и их траектории от нулевой точки входа потока в цилиндрическую часть гидроциклона из входного патрубка в модели модифицируемого гидроциклона

Установлено, что использование гидроциклона новой конструкции сократит количество повторных подач материала в гидроциклон по сравнению с используемой стандартной конструкцией.

Стоит отметить, что характер движения частиц в рабочей области модели гидроциклона с разделительной областью (рис. 3) отличается от стандартной модели (рис.2), а именно в том, что те частицы, которые оказались в нижней части конуса гидроциклона за счет дополнительной стенки после потери скорости, начинают образовывать направленный вверх водоворот и вновь набирая скорость выносятся через верхний слив, что позволяет улавливать большее количество мелких частиц в сравнении со стандартной конструкцией.

Выводы.

1. Предложено основное направление повышения эффективности классификации частиц, путем модификации гидроциклона ГЦК-360-10, путем организации разделительной области во входном патрубке, принимающим 2 потока жидкости с разной плотностью, одна из которых позволяет выводить крупные частицы пульпы из разделительной области на нижний слив.

2. Установлено, что для разработки моделей гидроциклонов и моделирования гидродинамического процесса целесообразно использовать CAD/CAE – систему SolidWorks, позволяющую строить модели, чертежи, решать вычислительную гидродинамику, проводить прочностные расчеты и вариативные исполнения различных конструкций.

3. Сравнительный анализ гидродинамического процесса показал, что конструкция гидроциклона с разделительной областью обладает большей эффективностью классификации частиц, чем конструкция стандартного аппарата, что обусловлено наличием перегородки в конической части гидроциклона, которая позволяет мелким частицам материала, попавшим в коническую область выйти на верхний слив, за счет образования в нижней части конуса направленного вверх водоворота.

4. Выявлено, характер движения частиц в ГЦК-360-10 имеет траектории частиц с размером 60 и менее мкм, которые по той или иной причине попадают в нижний слив, что в свою очередь увеличивает количество подач на домол в мельницу.

5. Установлено, что за счет омывания стенок разделительной области водой, скорость которой выше скорости пульпы, частицы крупной фракции быстро попадают на нижний слив за счет того, что плотность воды гораздо меньше плотности пульпы, из-за чего в нижней части конуса создается разрежение, и поэтому организуется направленный вверх водоворот частиц размером < 60 мкм. Это позволяет мелким частицам выходить на верхний слив из нижней части конуса, что уменьшает количество подач в мельницу на домол и позволяет экономить электроэнергию в сотни млн. руб в год.

Источник финансирования. *Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.*

Список литературы

1. Терновский И.Г., Кутепов А.М. Гидроциклонирование. М.: Наука, 1994. 350 с.

2. Бауман А.В. Гидроциклоны. Теория и практика. Новосибирск, Б29 Гормашэкспорт, 2020. 56 с.

3. Лозовая С.Ю., Строкова В.В., Соловьева Л.Н., Огурцова Ю.Н., Гринев А.П. Исследования влияния тонкомолотого цементного камня на свойства цементного вяжущего // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2010. № 4. С. 56–60.

4. Telichenko V.I., Sharapov R.R., Lozovaya S.Yu., Skel V.I. Analysis of the efficiency of the grinding process in closed circuit ball mills // MATEC Web of Conferences (см. в книгах). 2016. С. 04040.

5. Бащева Е. С., Лозовая С.Ю. Обзор конструкций гидроциклона для классификации огарков // Национальная конференция «Машины, агрегаты и процессы в строи-тельной индустрии». 2023. С. 14–19.

6. Бащева Е. С., Лозовая С.Ю. Повышение эффективности подготовки пиритных огарков для корректировки свойств высокомарочных цементов // Национальная конференция «Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии». 2023. - С. 10–13.

7. Лозовая С.Ю., Бащева Е. С. Совершенствование конструкции гидроциклона цилиндроконического типа // Национальная конференция «Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии». 2023. С. 46–51.

8. Богданов В. С. Технологические комплексы и линии для производства строительных материалов и изделий: Учеб. пособие/ В. С. Богданов, А.А. Борщевский, А. С. Ильин, В.С. Струков, Ю.М. Фадин; под редакцией А.С. Ильина. М.: Изд-во АСВ; Б.: Изд-во БелГТУ, 2003. 199 с.

9. Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Lozovaya S.Yu., Latyshev S.S., Bogdanov N.E., Vasilenko O.S. Ball mill power calculation with inclined partition // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Т. 8. № 3. С. 19031-19041.

10. Алямовский А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций в среде SolidWorks. М.: ДМК Пресс, 2010. 293 с.

11. Зиновьев Д.А. Основы проектирования в SolidWorks. М.: Студия Vertex 2015. 277 с.

Лозовая Светлана Юрьевна, д-р техн. наук, профессор lozwa@mail.ru, Россия, Белгород, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,

Бащева Екатерина Сергеевна, аспирант, bashchevakate@mail.ru, Россия, Белгород, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SEPARATION OF PYRITE CINDER PARTICLES IN PRESSURE-TYPE HYDROCYCLONES

S.Yu. Lozovaya, E.S. Bashcheva

The article considers the prospect of hydroclassification of fine fraction materials (less than 60 microns) in various industries. The design and principle of operation of pressure-type hydrocyclones ГЦК-360-10 and modified with a dividing area in the working area are described, their advantages and disadvantages are given. A new design of the hydrocyclone

is presented, which makes it possible to capture particles of prepared pyrite cinder with a size of less than 60 microns. The design and principle of operation of the devices under study are described, their digital models for hydrodynamic modeling using CAD/CAE systems are created. Computer modeling is relevant in the development of new products, it allows you to evaluate the functionality and operability of the future product at the early stages of design, compare its effectiveness with existing equipment. It is shown that the new design of the hydrocyclone provides an opportunity to improve the ГЦК-360-10 apparatus, which is used at enterprises of various industries. It is established that the use of the new hydrocyclone design will reduce the number of repeated feeds into it, as well as reduce the number of repeated feeds into the grinding mill, which will save electricity in the hundreds of millions of rubles per year.

Key words: hydroclassification, particle separation efficiency, design, CAD/CAE system, energy intensity.

Lozovaya Svetlana Yuryevna, doctor of technical sciences, professor, lozwa@mail.ru, Russia, Belgorod, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,

Bashcheva Ekaterina Sergeevna. postgraduate, bashchevakate@mail.ru, Russia, Belgorod, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

УДК 621.798:664 (075.8)
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-632-633

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.В. Пантюхина, О.В. Пантюхин, Д.В. Комаров

В статье рассмотрено обоснование выбора полимерного материала по его свойствам долговечности, в том числе деформационным, рациональных параметров оборудования для экструзии и упаковочного оборудования, расхода полимерного материала при производстве пакетов флоу-пак двух видов. Описаны результаты компьютерного моделирования указанных параметров в среде MathCAD.

Ключевые слова: полимерный упаковочный материал, экструзия полимеров, долговечность, одношнековый экструдер, упаковочное оборудование.

Полимерные упаковочные материалы очень часто используются для упаковывания различных изделий [1-3]. При выборе упаковочного полимерного материала необходимо проанализировать свойства полимеров, поэтому с целью выбора наиболее оптимального для упаковки полимера необходимо воспользоваться выражениями:

- для определения и анализа деформационной долговечности полимерного материала при ползучести в области быстрого нарастания деформации, предшествующей разрушению, воспользуемся выражением, оценивающим долговечность формы от основных прочностных характеристик материала

$$t_{\text{ф}} = A \cdot \exp\left(\frac{E_0 - \gamma^{/}\sigma}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

где A – постоянная материала; E_0 – энергия активации процесса ползучести; $\gamma^{/}$ – коэффициент интенсивности напряжения; σ – разрушающее напряжение; R – универсальная газовая постоянная; T – температура деформации;

- при длительном нагружении упаковочных полимерных материалов необходимо использовать обобщенную формулу для вычисления долговечности τ полимеров

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{R \cdot T}\right), \quad (2)$$

в которой τ_0 – коэффициент, характеризующий скорость тепловых колебаний атомов полимерного упаковочного материала; U_0 – энергия активации процесса разрушения; γ – коэффициент снижения энергии активации разрыва химических связей при действии приложенного напряжения [4].

С помощью выражения (1) оценим, как на величину $t_{\text{ф}}$ влияют прочностные свойства некоторых видов полимерных материалов: полистирол, полиметилметакрилат, поливинилхлорид. Для дальнейшего исследования все параметры упаковочных материалов были переведены в общепринятые единицы размерностей.

На рис. 1 представлены интерфейс прораммы *MathCAD* и графики зависимостей долговечности формы рассматриваемых полимеров от температуры в диапазоне от 200 до 250 К.

На рис. 2 представлены интерфейс программы *MathCAD* и графики зависимостей долговечности при длительном нагружении рассматриваемых полимеров от температуры в диапазоне от 200 до 250 К.

Наилучшими прочностными свойствами при деформации растяжения обладает полистирол, затем полиметилметакрилат и на последнем месте поливинилхлорид. Долговечность формы данных материалов в области быстрого нарастания деформации, предшествующей разрушению составляет от 0,38 до 0,07 с для полистирола, от 0,3 до 0,01 с для полиметилметакрилат и от 0,27 до 0,001 с для поливинилхлорида. При длительном нагружении наилучшими прочностными свойствами обладает поливинилхлорид, затем полистирол, полиметилметакрилат на последнем месте.

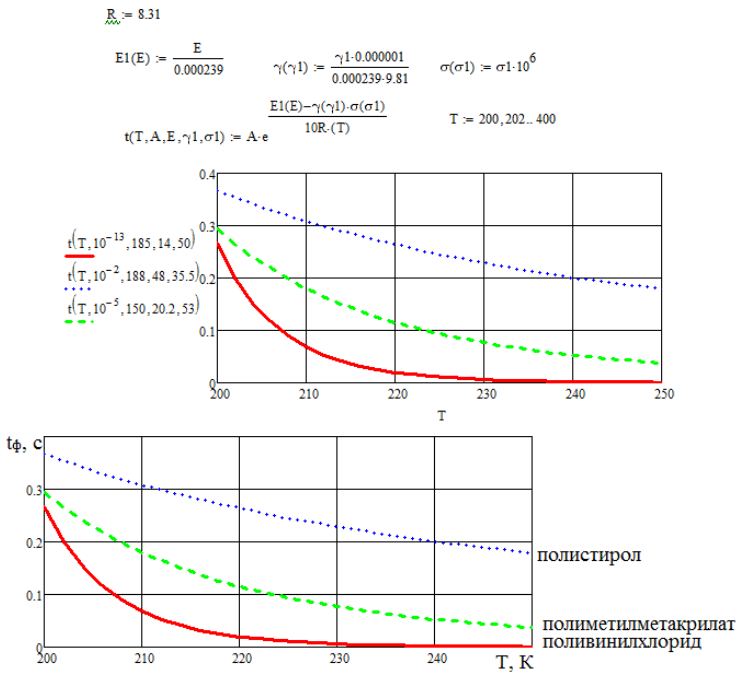
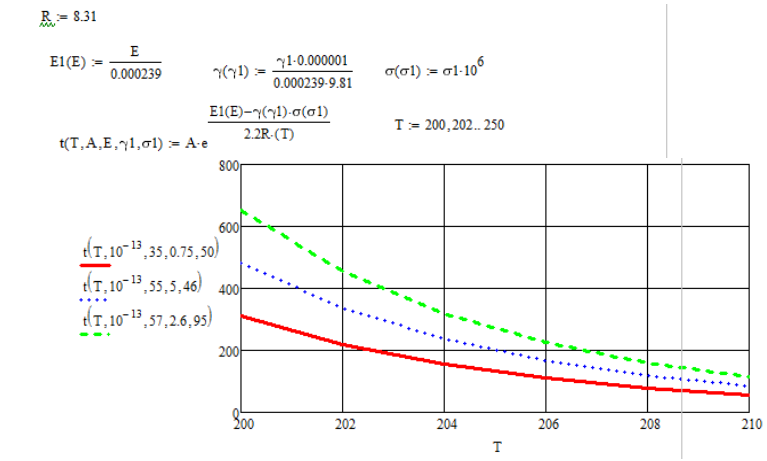


Рис. 1. Графики зависимостей долговечности формы от температуры для различных полимеров

Максимальная долговечность данных материалов при длительном нагружении 660 с для поливинилхлорида, 450 с для полистирола и 310 с для полиметилметакрилата при температуре 200 К. При этом к температуре 220 К долговечность резко снижается, практически падая до нуля. Таким образом, при ползучести в области быстрого нарастания деформации, предшествующей разрушению, наиболее прочным оказался полистирол, а при длительном нагружении – поливинилхлорид.



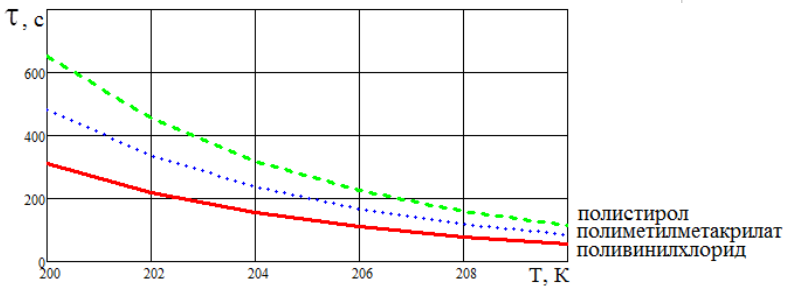


Рис. 2. Графики зависимостей долговечности от температуры для различных полимеров при длительном нагружении

Значение прочности сварного шва в зависимости от условий реализации процесса сварки можно определить с помощью построенных графиков и на основании этого выбрать оптимальные параметры процесса.

Таким образом, при выборе полимерного материала для упаковки изделия необходим многоуровневый анализ всего процесса создания тары. Решающими критериями выбора являются физико-механические свойства упаковочного материала, которые характеризуют его способность к свариванию или склейке и определяют оптимальные параметры фасовочно-упаковочного оборудования.

На производительность зоны дозирования оборудования для экструзии влияют частота вращения и габаритные размеры шнека, а также параметры процесса движения расплава полимера, то необходимо проанализировать, при каких параметрах производительность экструдера будет максимальной.

Диапазоны основных геометрических параметров шнека: диаметр вала *d* шнека от 35 до 92 мм; диаметр *D* вращающегося шнека от 77 до 188 мм, длина *L* шнека от 810 до 2000 мм. Для этих целей была разработана программа MathCAD, позволяющая при любых параметрах шнека экструдера и характеристиках полимерного материала оценить его производительность, например в зависимости от частоты вращения шнека (рис. 3).

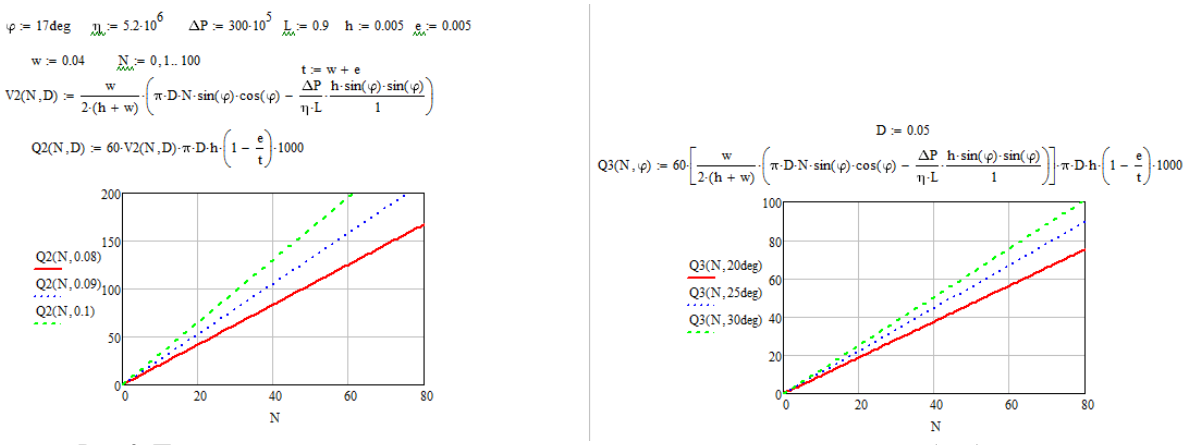


Рис. 3. Программа расчета оптимальных параметров шнека экструзионного оборудования, производящего полимерные пленки

При этом необходимо учитывать критическую частоту вращения шнека экструдера [5].

Для комплексной оценки производительности одношнекового экструдера и критической частоты вращения его шнека была разработана программа, позволяющая вычислить и выбрать оптимальный диапазон частот вращения шнека (рис. 4).

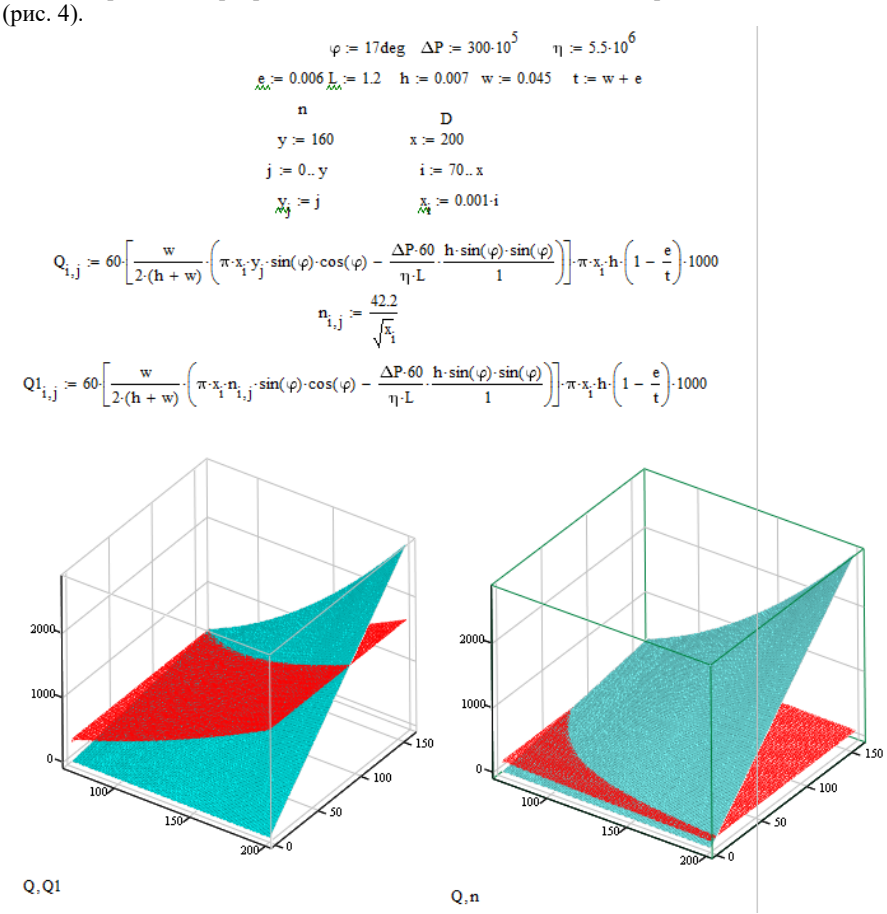


Рис. 4. Программа комплексной оценки производительности одношнекового экструдера и критической частоты вращения его шнека

Графики позволяют оценить производительность одношнекового экструдера в зависимости от частоты вращения *n* шнека и при учете критической частоты $n_К$ вращения шнека при необходимости ограничить ее.

Одним из функциональных устройств фасовочно-упаковочных машин является устройство для разматывания рулона полимерной пленки, то необходимо обеспечить его работоспособность с оптимальными параметрами [6, 7].

Для этих целей была разработана программа в среде *MathCAD*, которая позволяет определить оптимальное значение мощности привода упаковочных машин от частоты вращения при разматывании рулона для различных типов полимерных пленок, варьируя значением их плотности (рис. 5). Графики позволяют оценить мощность привода различных видов упаковочных машин, требуемой для разматывания рулона, от частоты вращения для различных типов полимерных пленок.

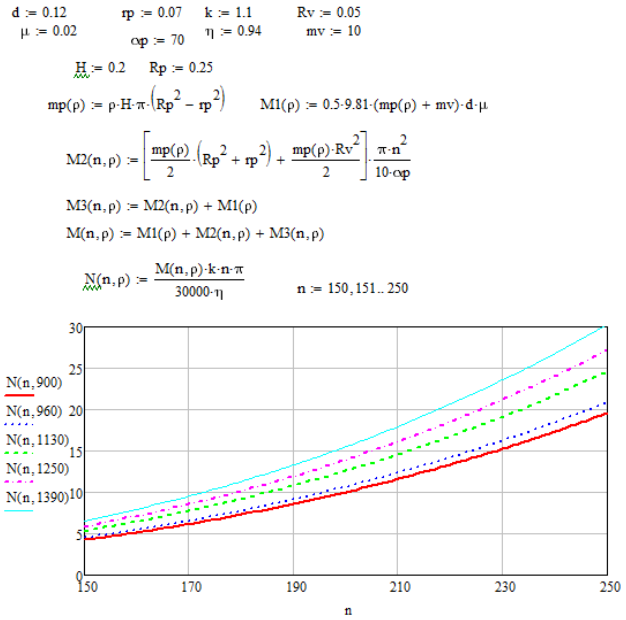


Рис. 5. Интерфейс программы MathCAD и графики зависимостей мощности привода упаковочных машин при разматывании рулона от частоты вращения для различных типов полимерных пленок

Для анализа расхода полимерного материала при производстве пакетов двух видов в автоматических машинах горизонтального и вертикального типов [8], характеризующих зависимость изменения количества пакетов по площади от свойств полимерной пленки была разработана программа в среде *MathCAD*, которая позволяет оценить оптимальный расход полимерного материала из различных полимеров на различное количество мягких пакетов из них (рис. 6).

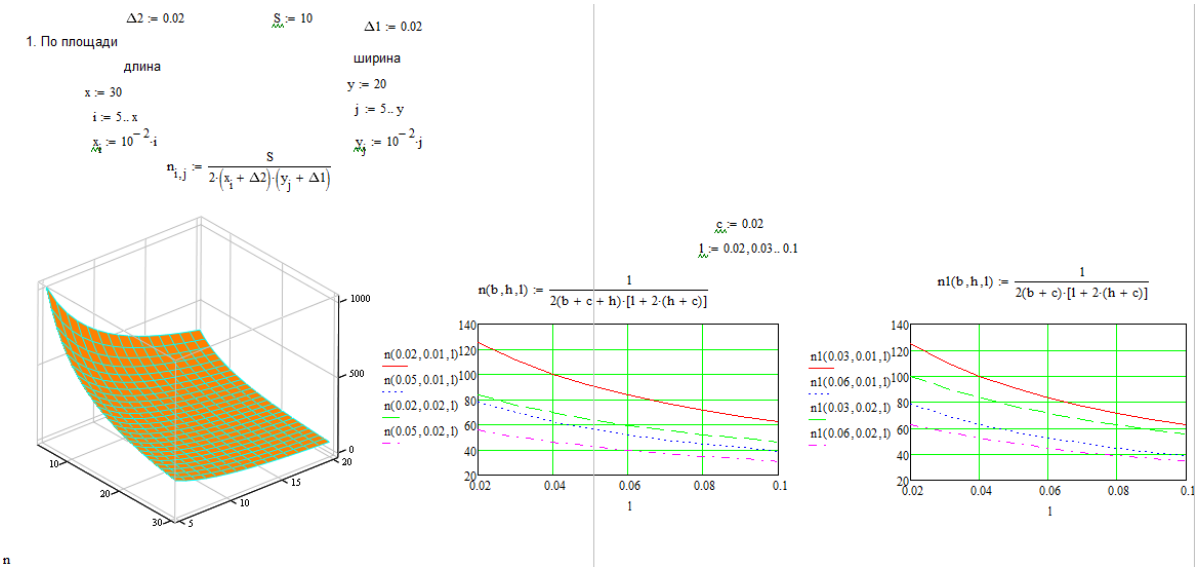


Рис. 6. Интерфейс программы MathCAD и графики зависимостей изменения количества пакетов по площади от свойств полимерной пленки

Программа позволяет рассчитать требующееся количество полимерной пленки на мягкие пакеты при фасовке в нее штучных и других видов изделий. Она учитывает размеры изделий, размеры получаемого пакета и допуски на швы пакета. Построенные методами компьютерного моделирования графики позволяют оценить количество пакетов для упаковки сыпучих продуктов, которые можно получить из определенного количества полимерной пленки в зависимости от геометрических параметров пакета.

Список литературы

1. Осипова К.С., Давыдов И.Б., Пантюхина Е.В. Особенности и основные виды упаковки различных видов замороженных полуфабрикатов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 11. С. 617-623.

2. Пантюхина Е.В., Котляров В.С., Пантюхин О.В. Перспективные технологии изготовления пищевой упаковки: учебник. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 212 с.

3. Пантюхина Е.В. Комплексная автоматизация пищевой промышленности: учебник, Тула, 2019. 216 с.

4. Рожков А.М. Исследование прочностных свойств полимерных упаковочных материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 4. С. 351-355.

5. Анализ производительности экструдера для производства многослойных упаковочных пленок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 10. С. 455-459.

6. Пантюхина Е.В. Современные технологии и оборудование упаковочных производств: учебник. Тула, 2020. 220 с.

7. Рожков А.М. Анализ основных параметров устройства для разматывания рулонов упаковочного полимерного материала // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 4. С. 360-364.

8. Рожков А.М. Обеспечение рациональных параметров полимерной тары в форме пакетов для сыпучих пищевых продуктов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 433-438.

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

Пантюхин Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент, директор издательства, olegpantyukhin@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Комаров Денис Викторович, магистрант, komarovd075@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

JUSTIFICATION OF RATIONAL PARAMETERS OF PROCESS AND EQUIPMENT FOR PRODUCTION POLYMER PACKAGING MATERIALS

E.V. Pantyukhina, O.V. Pantyukhin, D.V. Komarov

The article considers the justification of the choice of polymer material by its durability, including deformation, rational parameters of equipment for extrusion and packaging equipment, consumption of polymer material during the production of flow pack packages of two types. The results of computer simulation of the specified parameters in the MathCAD environment are described.

Key words: polymer packaging material, polymer extrusion, long-eternity, single-screw extruder, packaging equipment.

Pantyukhina Elena Viktorovna, candidate of technical science, docent, e.v.pant@mail.ru, Russia, Tula, Tula state university,

Pantyukhin Oleg Viktorovich, candidate of technical science, docent, publishing director, olegpantyukhin@mail.ru, Russia, Tula, Tula state university,

Komarov Denis Viktorovich, masters, komarovd075@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.86.067
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-637-638

УСТРОЙСТВА МАЯТНИКОВОГО ТИПА ДЛЯ СТУПЕНЧАТОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДАЧИ СЫПУЧИХ И ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ТЕЛ

Л.А. Федорова, А.П. Софьин, И.О. Кукушкин, Ю.И. Молодова

Рассмотрена типовая схема маятникового устройства для одного из вариантов дозирования сыпучих и газонаполненных материалов. Предложена методика оценивания устойчивости равновесных положений запорного элемента, входящего в состав маятникового устройства при заданных геометрических параметрах и наличии внешних сил. Предложенная схема позволяет обеспечить ступенчатый режим изменения расхода сыпучих веществ, в частности, при их подаче потребителям из бункера-накопителя, а также устройств с аналогичным назначением. Материалы статьи могут быть использованы при проектировании устройств близкого типа.

Ключевые слова: устойчивость, затвор, устройство, заслонка, наклон, энергия, конструкция.

При хранении, перегрузке и выполнении некоторых других операций с сыпучими материалами, включая их равномерное нанесение на различные поверхности, может возникнуть весьма актуальная проблема оперативного ступенчатого изменения расхода газонаполненных смесей. В классической постановке решение вопросов может быть реализовано путем проектирования сложных механических систем, с обязательным включением в их состав большого количества разветвленных трубопроводов, запорных органов и необходимых приводных механизмов.

Вопросы регулирования расхода могут решаться различными способами, в том числе и на основе ранее рассмотренных нами, например, [1]. Как уже не раз отмечено, основным условием реализуемости большинства предлагаемых технических вариантов следует считать отсутствие достаточно жестких ограничений по уровню герметичности средств хранения и расходных магистралей.

При подробном рассмотрении штатных способов ступенчатого регулирования расхода сыпучих тел, связанных с различными вариантами быстрого перевода оборудования на подачу другого вида продукта, а также смены направления (места) подачи интерес в большей степени вызывает устойчивость положения подвижного тела - затвора (задвижки), перекрывающего проходное сечение магистралей выдачи.

Параметры потока сыпучего материала с заданными параметрами (в том числе объемной или массовой производительности), определяются положением запорного элемента. С точки зрения исследования организации стабильной подачи сыпучих и газонаполненных веществ, следует провести оценку устойчивости различных положений равновесия задвижки (затвора). К запорному элементу следует предъявить основное требование, связанное с тем, что он должен занять необходимое и, главное, устойчивое пространственное положение, обеспечивающее перекрытие магистрали выдачи.

Ранее указывалось, что при использовании ограниченного числа положений вопрос может быть снят обеспечением жесткой связи «запорный элемент - приводное устройство». Но рост числа положений потребует создания сложных и разветвленных механизмов для привода запорного устройства. В свою очередь, рычажные конструкции потребуют создания значительных и меняющихся управляющих усилий.

В то же время проблема может быть решена с использованием облегченного привода и, соответственно, одиночного запорного устройства (затвора). Причем, регулирование подачи материалов в этом варианте обеспечивается установкой достаточно простых маятниковых клапанов, имеющих значительные проходные сечения.

В общем случае предлагается рассмотреть работу маятниковых клапанов с плоскими разворачивающимися (поворотными) затворами (заслонками), перекрывающими проходное сечение выдающих трубопроводов. Запорные органы в таких устройствах могут легко устанавливаться в заданное положение относительно потока сыпучего материала. Более глубокий анализ возможностей таких устройств позволяет говорить о перспективной установке маятниковых устройств в несколько рядов. При этом положение заслонок будет отличаться по заданному углу, а их поверхности будут располагаться в параллельных плоскостях.

При этом запорные затворы будут двигаться параллельно друг другу, приводимые в движение собственными маятниковыми устройствами. При этом для каждого устройства имеется вероятность того, что после окончательной остановки заслонки в необходимом положении могут возникнуть колебания запорного элемента. В свою очередь, отсутствие жесткой связи с приводом не позволит оперативно предотвратить изменения в расходе. Возникающие при открытии клапана колебательные движения могут привести к появлению нестабильного потока вещества на выходе из бункера и инициированию непрекращающихся неустановившихся режимов.

Положение и уровень устойчивости запорных элементов маятниковых клапанов определяет полноту и качество проведения расходных операций и, соответственно, выбор возможного варианта организации подачи и использующегося способа управления устройствами. Устранение неустойчивых режимов в дальнейшем позволит решить вопросы оперативного изменения расходных параметров устройства.

В вопросах проектирования аналогичных устройств, а также дальнейшей оценки устойчивости положений равновесия по установленным критериям использованы работы [2-7]. Заметим, что именно устройства с заслонками (затворами) позволят обеспечить бесперебойную подачу порошкообразных (сыпучих тел) необходимыми расходами. Значительным удобством является отсутствие требований по высокой степени герметичности. Используемая модель основана на материалах работы [8]. Условия возникновения и распространения механических колебаний трактуются на основе положений [9].

Отскоки, деформации и колебания запорных элементов могут привести к дополнительным погрешностям в величине расхода и даже к срыву подачи. В связи с этим предложенный вариант оценки устойчивости равновесного состояния запорного органа показывает наличие областей, в которых изменение характеристик, управляющих движением запорных элементов, в любом случае не приводит к его выходу из устойчивого равновесного состояния. Таким образом, устраняется переход звеньев в несанкционированные положения, а также возникновение колебаний.

К вопросу устойчивости элементов маятникового прибора, используемого для ступенчатого регулирования расхода. Рассмотрим типовой маятниковый прибор, устроенный следующим образом (схема на рис. 1).

К углу А пластины привязана нить, проходящая через кольцо К, отстоящее на расстоянии $a + b$ по вертикали от точки O. На нити висит груз весом Q.

Для исследования представленной маятниковой системы определим положения равновесия системы и оценим их устойчивость при вариации следующих силовых и геометрических параметров: $b/a = 0.5$ или $b = 0$; $Q/P = \sqrt{2}/2$.

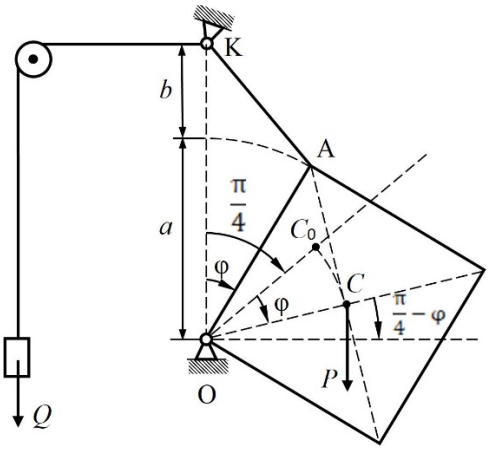


Рис. 1. Кинематическая схема маятникового устройства

Примем за обобщенную координату угол φ. Положим, что потенциальная энергия системы в положении, определяемом координатой $\varphi = 0$, равна нулю. Найдем потенциальную энергию системы как работу сил при перемещении из занимаемого положения в нулевое ($\varphi = 0$). Определяем точки C и C_0 как текущее положение центра масс и исходное положение центра масс, соответственно.

Расстояние от угла пластины А до кольца К определяется по формуле

$$|\mathrm{AK}| = \sqrt{(a+b)^2 + a^2 - 2(a+b)a\cos\varphi} = \sqrt{2a(a+b)(1-\cos\varphi) + b^2}\,.$$

Следовательно, потенциальная энергия системы будет равна

$$\Pi(\varphi) = Q\left[\sqrt{2a(a+b)(1-\cos\varphi) + b^2} - b\right] - P\frac{a\sqrt{2}}{2}\left[\sin\frac{\pi}{4} - \sin(\frac{\pi}{4} - \varphi)\right]. \quad (1)$$

Введем обозначения:

$$\frac{b}{a} = \gamma, \qquad \frac{Q}{P} = \lambda, \qquad \frac{\Pi(\varphi)}{Pa} = \mathrm{E}(\varphi),$$

где γ – безразмерный параметр, характеризующий «неидеальность» системы; λ – безразмерная сила; $\mathrm{E}(\varphi)$ – безразмерная потенциальная энергия.

С учетом принятых выше обозначений имеем

$$\mathrm{E}(\varphi) = \lambda\left[\sqrt{2(1+\gamma)(1-\cos\varphi) + \gamma^2} - \gamma\right] - \frac{1 - \cos\varphi + \sin\varphi}{2}. \quad (2)$$

Определим первую производную от безразмерной потенциальной энергии $\mathrm{E}(\varphi)$ по обобщенной координате φ:

$$\frac{\partial \mathrm{E}(\varphi)}{\partial\varphi} = \frac{\lambda(1+\gamma)\sin\varphi}{\sqrt{2(1+\gamma)(1-\cos\varphi) + \gamma^2} - \gamma} - \frac{\sin\varphi + \cos\varphi}{2}. \quad (3)$$

В равновесном положении механической системы $\frac{\partial \mathrm{E}(\varphi)}{\partial\varphi} = 0$ или

$$\frac{\lambda(1+\gamma)\sin\varphi}{\sqrt{2(1+\gamma)(1-\cos\varphi) + \gamma^2} - \gamma} - \frac{\sin\varphi + \cos\varphi}{2} = 0. \quad (4)$$

Зависимости потенциальной энергии E и ее первой производной от угла поворота φ при $\gamma = 0.5$ представлены на рис. 2 и 3. Очевидно, что система имеет два равновесных положения: устойчивое – в интервале $(0, \pi/3)$, неустойчивое – в интервале $(-2\pi/3, -\pi/3)$.

В случае идеальной системы $\gamma = 0$, тогда из соотношений (2), (3) получаем

$$\mathrm{E}(\varphi) = 2\lambda\left|\sin\frac{\varphi}{2}\right| - \frac{1 - \cos\varphi + \sin\varphi}{2}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathrm{E}(\varphi)}{\partial\varphi} = sign(\sin\frac{\varphi}{2})\lambda\cos\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin\varphi + \cos\varphi}{2}. \quad (6)$$

Этим зависимостям соответствуют кривые, приведенные на рис. 4, 5.

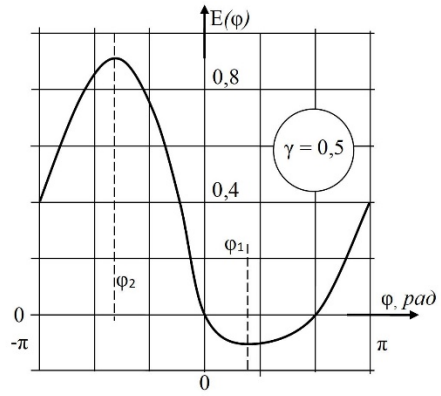


***Рис. 2. Зависимость потенциальной энергии* E *от* φ *при* γ = 0.5**

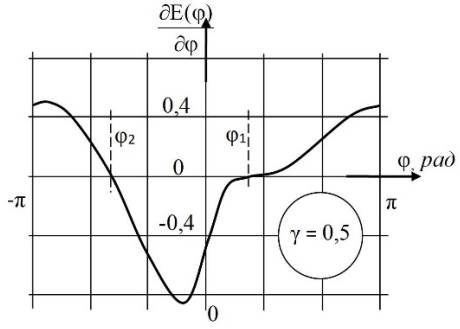


***Рис. 3. Зависимость первой производной потенциальной энергии* E *от* φ *при* γ = 0.5**

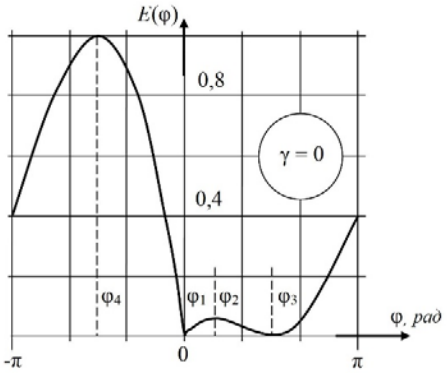


***Рис. 4. Зависимость потенциальной энергии* E *от* φ *при* γ = 0**

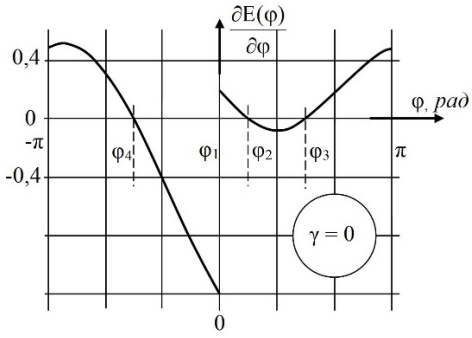


***Рис. 5. Зависимость первой производной потенциальной энергии* E от φ при γ = 0**

По представленным графикам видно, что при γ = 0 у потенциальной энергии в точке $\varphi = 0$ не существует производной. По этой причине обобщенная сила (производная от потенциальной энергии) имеет разрыв при $\varphi = 0$. Так как этому значению обобщенной координаты отвечает минимум потенциальной энергии (рис. 4), то равновесное положение системы $\varphi_1 = 0$ является устойчивым. Другие равновесные положения системы могут быть определены из условия равенства нулю первой производной от потенциальной энергии системы по формуле (6).

Итак, получаем следующие значения обобщенной координаты φ, соответствующие равновесным положениям системы:

$\varphi_1 = 0$ – устойчивое положение равновесия;

$\varphi_2 = \pi/6$ – неустойчивое положение равновесия;

$\varphi_3 = \pi/2$ – неустойчивое положение равновесия;

$\varphi_4 = -\pi/2$ – неустойчивое положение равновесия.

Зависимости безразмерной силы λ от обобщенной координаты φ, соответствующие решению уравнения (4) при $\gamma = 0$ и $\gamma = 0.5$, показаны на рис. 6, 7.

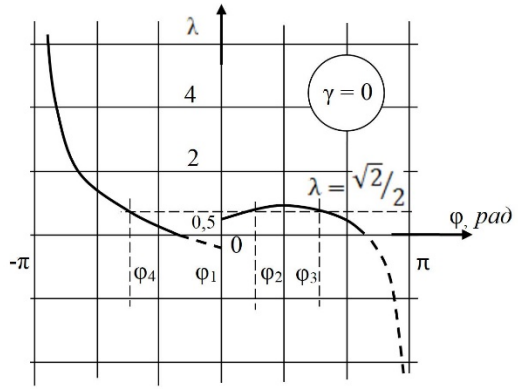


Рис. 6. Зависимость безразмерной силы λ от φ при γ = 0

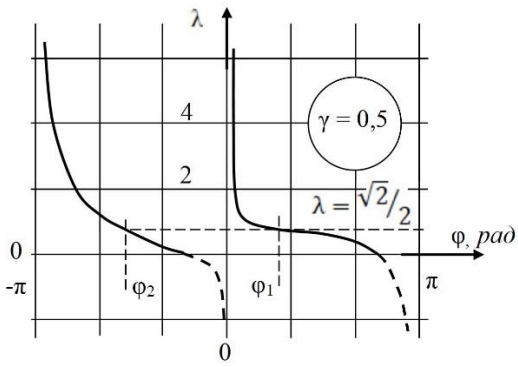


Рис. 7. Зависимость безразмерной силы λ от φ при γ = 0,5

Участкам кривых, отмеченным на рисунках штриховой линией, соответствуют невозможные положения равновесия механической системы в условиях данной задачи, т.е. при различных значениях $\lambda < 0$.

Выводы. Вопрос использования бункерных систем для оперативного ступенчатого перехода на выбранные расходы является достаточно актуальным до настоящего времени. Его решение может определяться применением маятниковых систем.

Представленные в статье результаты показывают возможность ступенчатого регулирования расходов путем использования маятниковых запорных устройств. Важнейшим аспектом при проектировании и дальнейшем использовании их запорных элементов становится исследование равновесных устойчивых положений. В представленной статье для типовой схемы оценка выполнена для углов поворота φ запорного органа в диапазоне от $-\pi$ до π.

По результатам расчетов построены кривые, характеризующие зависимости потенциальной энергии от угла поворота запорного элемента и ее первой производной, на основе анализа которых выделены положения ее устойчивого и неустойчивого равновесия. Для частного случая – так называемой идеальной системы – проведено исследование устойчивости положений равновесия при изменении соотношений внешних сил.

Положения неустойчивого равновесия определяются соотношениями геометрических параметров системы. При $\gamma = 0$ неустойчивость проявляется для значений угла $\varphi = \pi/6$ и $\varphi = -\pi/2$, при $\gamma = 0.5$ неустойчивость проявляется в интервале значений $\varphi = [-2\pi/3; -\pi/3]$.

Список литературы

1. Многопозиционные устройства маятникового типа в бункерных системах подачи сыпучих тел / Л.А. Федорова, А.П. Софьин, И.О. Кукушкин, О.Н. Арсеньев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 7. С. 433-439.

2. Теоретические основы проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств / Е.В. Давыдова, Е.В. Прейс // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. №7-1. С. 10-20.

3. Федорова Л.А., Софьин А.П. Оценивание устойчивости корневого звена манипулятора при действии на него осевой нагрузки / Л.А. Федорова, А.П. Софьин, Л.К. Горшков, И.Г. Уханов // Труды МАИ. 2022. №124 [Электронный ресурс] URL: http:/trudymai.ru/published.php?ID=166900&mobile=Y (дата обращения: 11.04.2023).

4. Кинематика, устойчивость и динамика пространственного упруго-деформируемого механизма / Б.К. Нурахметов, К.З. Сартаев, Ж.М. Мырзагельдиева, Ж.Т. Жумашева // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. №5 (371). С. 189 – 195.

5. Загадки теории динамических систем: на границе механики / И.И. Блехман // Вестник научно-технического развития. 2008. №3 (7). С. 2 – 8.

6. Ляпунов А.М. Избранные труды. М.: АН СССР, 1948. 542 с.

7. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. М.: Наука, 1990. 176 с.

8. Лагранж Ж. Аналитическая механика. Т. 2. / перевод с франц. М.: Гос. из-во технико-теоретической лит., 1950. 594 с.

9. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. 3-е изд. М.: Наука, 1991. 256 с.

Федорова Людмила Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Софьин Алексей Петрович, канд. техн. наук, доцент, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

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

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

PENDULUM-TYPE DEVICES FOR STEP-BY-STEP REGULATION OF THE SUPPLY OF BULK AND GAS-FILLED BODIES

L.A. Fedorova, A.P. Sofin, I.O. Kukushkin, Y.I. Molodova

A typical scheme of a pendulum device for one of the dosing options for bulk and gas-filled materials is considered. A method is proposed for estimating the stability of the equilibrium positions of the locking element, which is part of the pendulum device with given geometric parameters and the presence of external forces. The proposed scheme makes it possible to provide a step-by-step mode of changing the flow of bulk substances, in particular, when they are supplied to consumers from a storage hopper, as well as devices with a similar purpose. The materials of the article can be used in the design of devices of a similar type.

Key words: stability, shutter, device, flap, energy, tilt, design.

Fedorova Lyudmila Anatolyevna, candidate of technical sciences, docent, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky,

Sofin Aleksey Petrovich, candidate of technical sciences, docent, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky,

Kukushkin Igor Olegovich, candidate of technical sciences, docent, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky,

Molodova Yulija Igorevna, candidate of technical sciences, docent, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.914
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-642-643

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ СТАНДАРТИЗОВАННЫМИ ДИСКОВЫМИ ФРЕЗАМИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

А.Г. Кондрашов, Д.Т. Сафаров, А.И. Фасхутдинов

В статье рассмотрены методы формообразования зубчатых венцов стандартизованным инструментом на станках с ЧПУ. Выявлены недостатки технологического обеспечения таких процессов в части параметров режима резания. Запланирован и проведен производственный эксперимент по формообразованию зубчатых венцов грузового автомобиля на токарно-фрезерном обрабатывающем центре стандартизованными дисковыми фрезами. По результатам экспериментальной обработки предложены схемы формообразования и рекомендуемые параметры режима резания для достижения 7-й и 8-й степеней точности нарезаемых зубчатых венцов.

Ключевые слова: Зубчатый венец, зубонарезание, лезвийное формообразование, стандартизованный инструмент, дисковая фреза.

В состав наиболее ответственных узлов и агрегатов современного большегрузного автомобиля, среди которых - двигатель, КПП, мосты, раздаточные коробки и пр. входит широкая номенклатура зубчатых передач. Мощности двигателя и крутящий момент коробок передач в XXI в. возросли примерно в 3 раза. Сегодня для достижения максимальной нагрузочной способности венцов в ограниченных габаритах конструктор оптимизирует целый ряд параметров передачи, зачастую совсем отходя от стандартного исходного контура и выбирая его на основе компьютерных расчетов. Для этих венцов должны быть выполнены: технологическое проектирование, подбор оборудования и оснастки, изготовление опытных образцов, испытания и др. Если раньше такой комплекс работ длился несколько лет, то сегодня он должен быть выполнен максимум за полгода.

Поэтому сейчас важнейшей задачей является безошибочное проведение подготовки серийного производства в кратчайшие сроки. Так, освоение линейки новых узлов или агрегатов в составе автомобиля требует изготовление в опытном производстве до 100 партий зубчатых венцов по 3…7 деталей. Проектирование и изготовление для этих целей специального режущего инструмента (долбяков, червячных фрез, обкаточных резцов) значительно удлиняет процесс подготовки производства и изготовления опытных деталей.

Широкое применение многокоординатных станков с ЧПУ приводит к значительному интересу исследователей и предприятий к обработке опытных образцов зубчатых венцов стандартизованными дисковыми или концевыми инструментами. На сегодняшний день известен целый ряд работ [1-6], посвященный проектированию технологии обработки зубчатых венцов на станках с ЧПУ стандартизованным инструментом.

Доступным универсальным инструментом для предпрятий является концевая фреза [12]. Для подготовки управляющих программ необходимо разработать 3D модель обрабатываемого зубчатого колеса, затем при помощи стандартных инструментов CAM-системы задать траектории перемещения и сгенерировать код управляющей программы. В [7] приведен типовой маршрут обработки зубчатого венца. Сначала выполняется переход чернового фрезерования, он устраняет основный припуск из впадины зубчатого колеса, при этом по боковым сторонам оставляется гарантированный припуск.

Обработке зубчатых колес на фрезерных станках с ЧПУ посвящены работы [8-10]. Авторами предлагаются методики расчета траекторий перемещения инструмента на станке с ЧПУ для формообразования венцов как с прямым, так и с винтовым зубом, а также конструкции инструмента [8, 11].

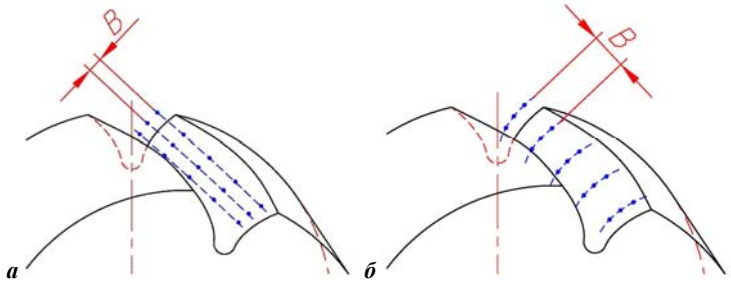
Обзор литературных источников показал отсутствие рекомендаций по выбору параметров обработки для достижения заданной степени точности зубчатых венцов.

Методика исследования. Учитывая, жесткие требования к точности зубчатых венцов в автомобилестроении, в работе решается задача достижения 7-й и 8-й степеней точности венцов (окончательно обработанных и с припуском под последующее шлифование) путем подбора параметров режима резания. В качестве объекта исследования выбран сателлит колесной передачи грузового автомобиля. Обработка зубьев выполнена на токарно-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ Integrex i300S ф. Mazak (рис. 1, а). Режущий инструмент дисковые фрезы Sandvik Coromill 161 и 162 (рис. 1, б).

С целью формирования рекомендаций по схемам фрезерования и параметрам режима резания для достижения требуемой точности и шероховатости обработка выполнена по следующему плану (таблица 1). Предварительное удаление припуска для всех вариантов обработки выполнено дисковой фрезой Coromill 162, а чистовое фрезерование дисковой фрезой Coromill 161. План предусматривает продольную и поперечную обработка (рис. 2) при варьировании шага строчки, глубины резания, подачи и скорости резания. Для каждой партии деталей разработана своя управляющая программа.

а *б*

Рис. 1. Токарно-фрезерный обрабатывающий центр с ЧПУ: а – внешний вид; б – инструментальный магазин



а *б*

Рис. 2. Схемы фрезерования боковых профилей зубьев: а – продольное фрезерови; б – поперечное фрезерование

План экспериментальной обработки венцов

№ партии	Схема фрезерования	Шаг строчки, мм	Sz, мм/зуб	n, об/мин	Sмин, мм/мин	Vрез, м/мин
1.1	Продольная	0,4	0,08333	1500	1500	377
1.2		0,6				
1.3		0,8				
1.4		1,0				
1.5		1,2				
1.6	Поперечная	2	0,08333	1500	1500	377
1.7		3				
1.8		4				
1.9		5				
1.10		6				
2.1	Продольная	0,6	0,05	1500	900	377
2.2			0,06667		1200	
2.3			0,08333		1500	
2.4			0,1		1800	
2.5			0,11667		2100	
2.6	Поперечная	3	0,05	1500	900	377
2.7			0,06667		1200	
2.8			0,08333		1500	
2.9			0,1		1800	
2.10			0,11667		2100	
3.1	Продольная	0,6	0,08333	1200	1200	302
3.2				1400	1400	352
3.3				1600	1600	402
3.4				1800	1800	452
3.5				2000	2000	502
3.6	Поперечная	3	0,08333	1200	1200	302
3.7				1300	1400	352
3.8				1400	1600	402
3.9				1500	1800	452
3.10				1600	2000	502

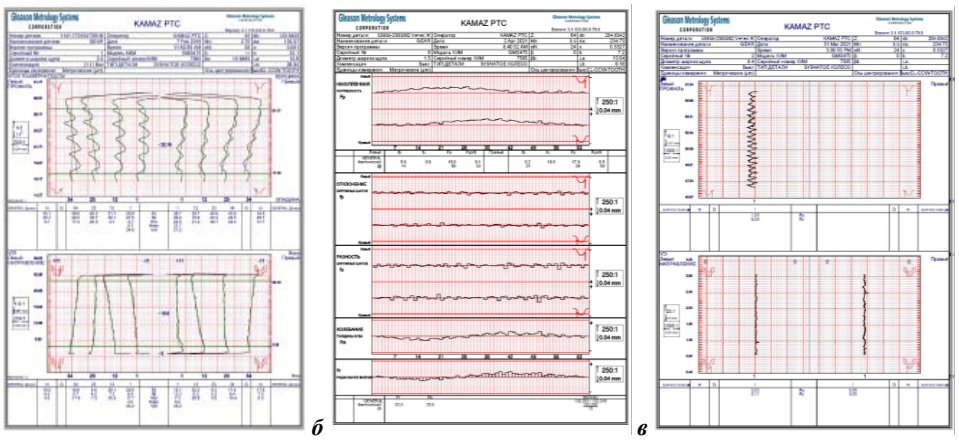
Измерение показателей геометрической точности и шероховатости поверхности выполнено на координатно-измерительной машине GMS475 ф. Gleason. По результатам измерения деталей на КИМ получены протоколы отображающие следующие погрешности венца (рис. 3).

Обработка при продольных рабочих ходах с варьированием шага фрезерования показала что такие показатели точности венца как радиальное биение и погрешности окружных шагов изменяются незначительно (рис. 4). Погрешность направления практически не изменяется и соответствует 6-й степени точности (рис. 4, г).

Для данного вида оборудования и оснастки уровень погрешностей соответствуют 7-й степени точности по ГОСТ ИСО 1328-1-2017. Как видно по рис. 5 при продольной обработке шаг фрезерования *B* оказывает значимое воздействие на погрешность профиля и величину шероховатости поверхности.

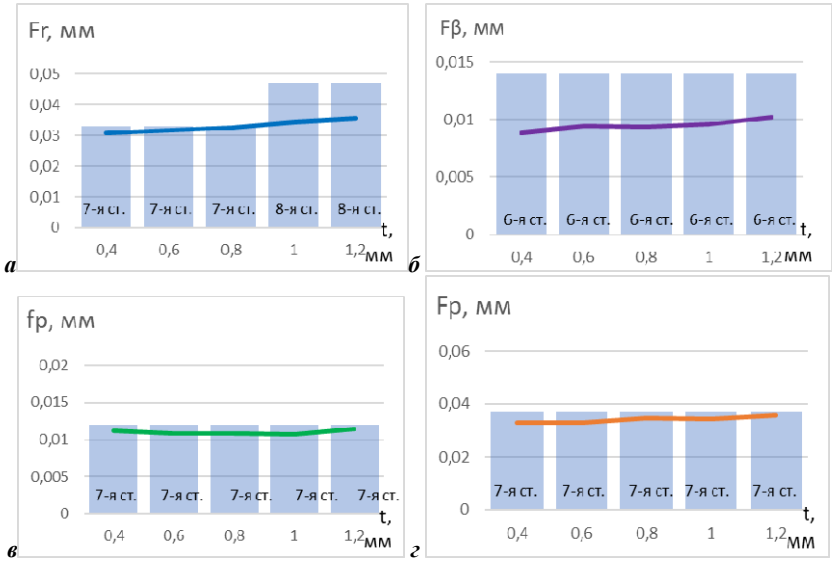
На рис. 6 показана взаимосвязь шероховатости поверхности зубьев и режимов резания (*t*, *Sz* и *V*) при продольной обработке. По графикам видно, что наибольшее влияние на шероховатость оказывает величина подачи. Изменения глубины резания влияет в меньшей степени, а скорости резания практически не влияет.

Обработка при поперечных рабочих ходах с варьированием шага фрезерования также показала что такие показатели точности венца как радиальное биение и погрешности окружных шагов, а также погрешность профиля изменяются незначительно (рис. 7).



а *б* *в*

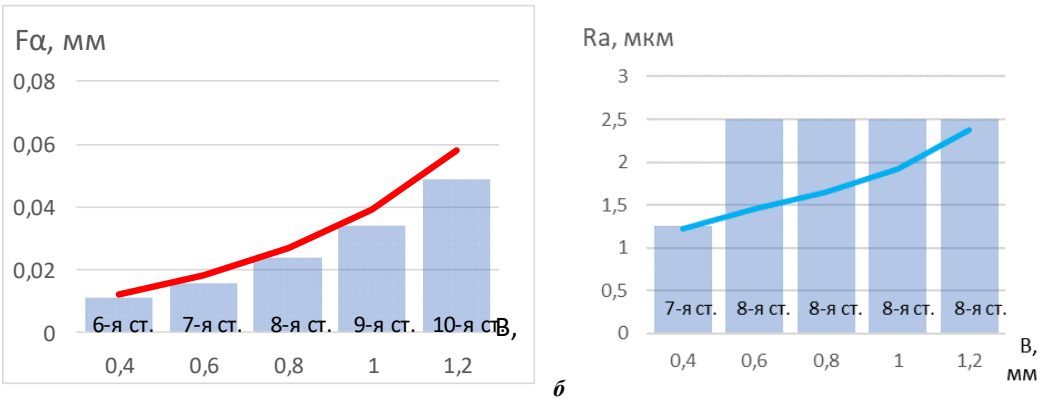
Рис. 3. Протоколы измерения КИМ Gleason GMS475 (а – погрешности профиля и направления; б – погрешности окружных шагов и радиальное биение; в – шероховатость поверхности)



а *б* *в* *г*

Рис. 4. Показатели точности зубьев (а – радиальное биение; б – погрешность направления; в – погрешность окружного шага; г – накопленная погрешность окружного шага)

Для данного вида оборудования и оснастки уровень погрешностей соответствуют 7-й степени точности по ГОСТ ИСО 1328-1-2017. Как видно по рис. 5 при продольной обработке шаг фрезерования *B* оказывает значимое воздействие на погрешность профиля и величину шероховатости поверхности.



а *б*

Рис. 5. Зависимость показателей точности зубьев от шага фрезерования при t = 2 мм; S_Z = 0,083 мм/зуб; V = 377 м/мин (а – погрешность профиля, б – шероховатость поверхности)

На рис. 6 показана взаимосвязь шероховатости поверхности зубьев и режимов резания (*t*, *Sz* и *V*) при продольной обработке. По графикам видно, что наибольшее влияние на шероховатость оказывает величина подачи. Изменения глубины резания влияет в меньшей степени, а скорости резания практически не влияет.

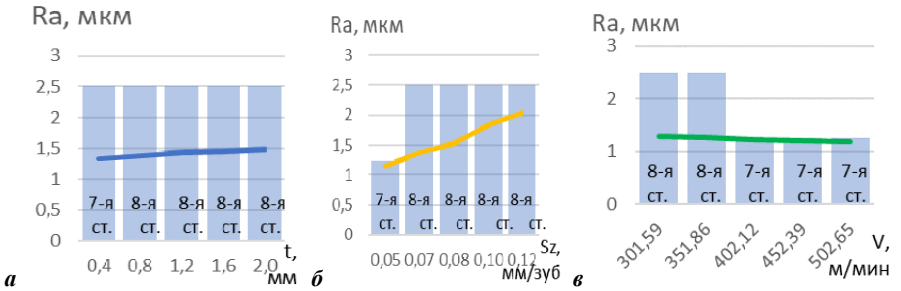


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности от режимов резания (а –глубины резания при S_Z = 0,083 мм/зуб и V = 377 м/мин, б – подачи при t = 2 мм и V = 377 м/мин, в – скорости резания при t = 2 мм и S_Z = 0,083 мм/зуб)

Обработка при поперечных рабочих ходах с варьированием шага фрезерования также показала что такие показатели точности венца как радиальное биение и погрешности окружных шагов, а также погрешность профиля изменяются незначительно (рис. 7).

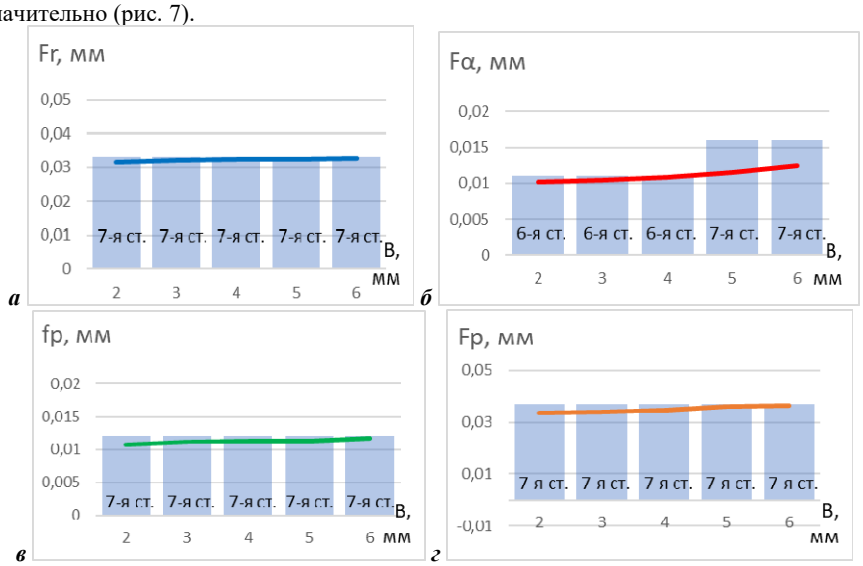


Рис. 7. Показатели точности зубчатого венца (а – радиальное биение; б – погрешность профиля; в – погрешность окружного шага; г – накопленная погрешность окружного шага)

Как видно по рис. 8 при поперечной обработке шаг фрезерования *B* в большей степени оказывает влияние на погрешность направления.

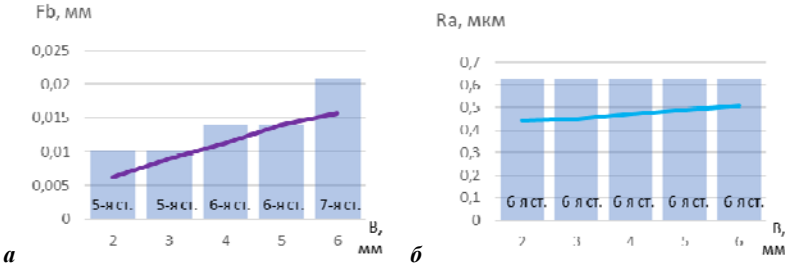


Рис. 8. Зависимость показателей точности зубьев от шага фрезерования при t = 1,2 мм; S_Z = 0,083 мм/зуб и V = 377 м/мин (а – погрешность профиля, б – погрешность направления)

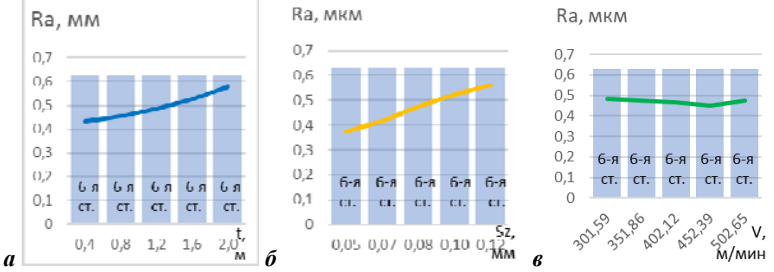


Рис. 9. Зависимость шероховатости поверхности от режимов резания (а – глубины фрезерования при S_Z = 0,083 мм/зуб и V = 377 м/мин, б – подачи при t = 1,2 мм и V = 377 м/мин, в – скорости резания при t = 1,2 мм и S_Z = 0,083 мм/зуб)

На рис. 9 показана взаимосвязь шероховатости поверхности зубьев и режимов резания (*t*, *Sz* и *V*) при поперечной обработке. По графикам видно, что наибольшее влияние на шероховатость оказывает величина подачи. Изменения глубины и скорости резания влияют в меньшей степени.

Результаты и их обсуждение. Таким образом, по комплексу параметров точности и качества продольная обработка позволяет достичь 8-ю степень точности, и может быть рекомендована как предварительная под последующее зубошлифование, а поперечная – позволяет достичь 7-ю, а при необходимости и 6-ю степень точности и может быть рекомендована как окончательная.

Для условий опытного и мелкосерийного производства предложены две схемы формообразования эвольвентного профиля венца стандартными дисковыми фрезами с неперетачиваемыми твердосплавными пластинами на четырех и пятикоординатных станках с ЧПУ:

Для предварительного формообразования под зубошлифование – построчная по винтовой линии зуба, обеспечивающая 8-ю степень точности. Рекомендуемые параметры режима резания при фрезеровании венца дисковой фрезой Ø80: t = 2 мм; Sz = 0,075…0,1 мм/зуб; V = 350…400 м/мин;

Для окончательного формообразования по 7-й степени точности - построчная по профилю зуба. Рекомендуемые параметры режима резания при фрезеровании венца дисковой фрезой Ø80: t = 1,2 мм; Sz = 0,06…0,08 мм/зуб; V = 350…400 м/мин.

Список литературы:

1. Glaser T., Korner T., Sapparth J., Wennmo M. Hard machining of spur gears with the InvoMilling method / Journal of Manufacturing and materials processing. 2018, 2, 44; doi:10.3390/jmmp2030044
2. Kawasaki K., Tsuji I. and Gunbara H. Manufacturing method of double-helical gears using CNC machining center / Proc IMechE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 0(0) 1–8
3. Kawasaki K., Tsuji I. Machining method of large-sized cylindrical worm gears with Niemann profiles using CNC machining center / The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2019
4. Terai H., Asao T., Yagami R. Proposition of a new gear cutting method using by taper endmill/ The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, ICPE2018
5. Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т., Казаргельдинов Р.Р., Глинина Г.Ф. Обработка косозубых цилиндрических колес концевыми фрезами на четырехкоординатных фрезерных станках с ЧПУ / Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2021. № 3 (77). С. 38-44
6. Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т., Фасхутдинов А.И., Казаргельдинов Р.Р. Технология формообразования косозубых зубчатых венцов дисковыми и концевыми фрезами на пятикоординатных станках с числовым программным управлением / Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 123-136.
7. Кравченко К. Разработка в CAM-системе PowerMILL управляющей программы для обработки спирёального конического зубчатого колеса на пятиосевом станке с ЧПУ / САПР и графика № 8 2012 г. с. 80-83
8. Отт О.С. Разработка сборных дисковых фрез с кинематическим обкаточным движением для обработки зубчатых колес крупного модуля на станках с ЧПУ / Дисс. канд. техн. наук. М.: МГТУ «СТАНКИН». 2011. 154 с.
9. Пат. 2677553 РФ на изобретение, Способ обработки зубьев зубчатых колес дисковым лезвийным инструментом / Кондрашов А.Г., Фасхутдинов А.И., Хисамутдинов Р.М., Пашков М.В., опубл. 17.01.2019
10. Пат. № 2453404 РФ на изобретение Способ обработки боковых сторон профиля цилиндрических зубчатых эвольвентных колес / Негинский Е.А., Отт О.С., Артюхин Л.Л., опубл. 20.06.2012
11. Пат. № 2567073 РФ на изобретение Зуборезная фреза и способ фрезерования зубьев элементов зубчатой передачи / Шебарт Ш., опубл. 27.10.2015
12. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В., Козлова О.В. Концевая однозубая модульная фреза для финишной обработки зубчатых колес // Известия ТулГУ. Технические науки, 2013. Вып. 8. С. 232-237.

Кондрашов Алексей Геннадьевич, канд. техн. наук. доцент, Kondrahov@mail.ru, Россия, Республика Татарстан, Набережные Челны, Набережночелнинский институт (филиал) Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Сафаров Дамир Тамасович, канд. техн. наук. доцент, safarov-dt@mail.ru, Россия, Республика Татарстан, Набережные Челны, Набережночелнинский институт (филиал) Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Фасхутдинов Айрат Ибрагимович, канд. техн. наук, FashutdinovAI@gmail.com, Россия, Республика Татарстан, Набережные Челны, ПАО КАМАЗ

CHARACTERISTICS OF THE ACCURACY AND ROUGHNESS OF THE SURFACES OF THE TEETH OF THE GEAR RINGS WHEN FORMING WITH STANDARDIZED DISK CUTTERS ON CNC MACHINES

A.G. Kondrashov, D.T. Safarov, A.I. Faskhutdinov

The article discusses the methods of shaping toothed crowns with a standardized tool on CNC machines. Shortcomings of technological support of such processes in terms of parameters of the cutting mode are revealed. A production experiment was planned and carried out on the shaping of truck gear rings at a turning and milling machining center with standardized disc cutters. Based on the results of experimental processing, the forming schemes and recommended parameters of the cutting mode are proposed to achieve the 7th and 8th degrees of accuracy of the toothed crowns being cut.

Key words: toothed crown, tooth cutting, blade shaping, standardized tool, disc milling cutter.

Kondrashov Alexey Gennadievich, candidate of technical sciences, docent, Kondrahov@mail.ru, Russia, Republic of Tatarstan, Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the Kazan (Volga Region) Federal University,

Safarov Damir Tamasovich, candidate of technical sciences, docent, safarov-dt@mail.ru, Russia, Republic of Tatarstan, Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the Kazan (Volga Region) Federal University,

Faskhutdinov Ayrat Ibragimovich, candidate of technical sciences, FashutdinovAI@gmail.com, Russia, Republic of Tatarstan, Naberezhnye Chelny, KAMAZ

УДК 621.9 + 06
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-647-648

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ И ШУМА КОРОБОК СКОРОСТЕЙ ТОКАРНЫХ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ С ДВУХСТОРОННИМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

К.И. Абдульманова, В.А. Финоченко, А.Н. Чукарин

Несмотря на малые мощности привода дневного движения токарные станки ТД 20, ТП 40 и ТВ 63 имеют высокие скорости вращения шпинделей 2150 и 2500 об/мин (соответственно) и поэтому создают повышенные уровни шума на рабочих местах станочников даже на холостом ходу. Источником повышенной интенсивности звукового излучения о колебательной системе корпусных и базовых деталей является шпиндельная бабка. Корпусные детали коробки передач с любым количеством частот вращения представляют собой полные коробчатые детали по форме близкие к прямоугольным параллепипедам, а изучающие звуковую энергию элементы представляют собой плоские пластины ограниченных размеров. В данной статье представлен расчет скоростей пластинчатых конструкций, которые являются энергетически замкнутыми системами. В связи с тем, что энергетически замкнутые системы имеют малые величины диссипативной функции, определяемой коэффициентами потерь колебательной энергии, то для таких конструкций для расчета уровней шума предложено использовать метод энергетического баланса.

Ключевые слова: токарные деревообрабатывающие станки, шпиндельные бабки, звуковое давление, метод энергетического баланса.

Токарные деревообрабатывающие станки предназначены для ручного точения цилиндрических и фасонных поверхностей, и достаточно интенсивно используются в различных отраслях народного хозяйства, а сама токарная обработка представляет собой процесс прерывистого резания лезвийным инструментом. Принципиальные схемы обработки резанием основаны на сочетании двух элементарных движений – вращательного и прямолинейного. Станки подобного типа оснащены 2, 4 и 6 ступенчатыми коробками скоростей. В таблицах 1 - 3 приведены технические характеристики станков данного типа на примере ТД 20, ТП 40 и ТВ 63.

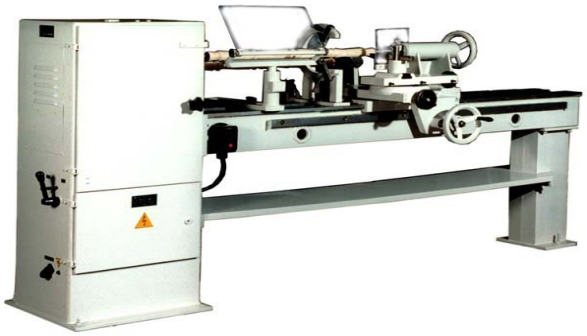


Рис. 1. Станок токарный станок ТД 20

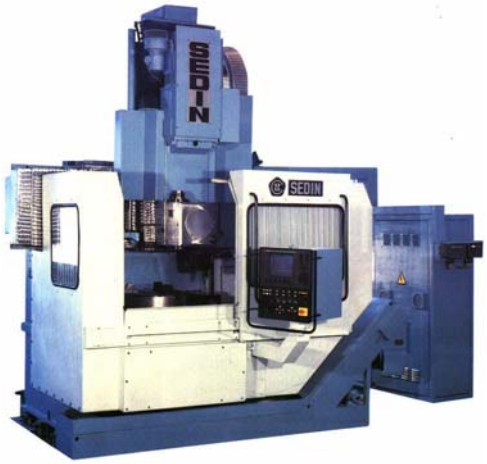


Рис. 2. Станок токарный станок ТВ 63

Таблица 1

Технические характеристики токарного станка ТД 20

Наибольший диаметр обрабатываемого изделия, мм:	300
- при копировании	180
Расстояние между центрами при крайнем положении задней бабки с вдвинутой пинолью, мм	1200
Наибольшая длина детали, обтачиваемой с копиром, мм	1200
Наибольший перепад диаметров изделия при работе с копиром, мм	100
Высота оси центров от базовой поверхности станины, мм	220
Конус отверстия пиноли	Морзе 4
Диаметр патрона, мм	200
Частота вращения шпинделя, об/мин	750; 1440; 2880
Мощность привода, кВт	2,2
Габаритные размеры, мм	2300x985x1240
Масса, кг	400

Таблица 2

Технические характеристики токарного станка ТВ 63

Расстояние между центрами, мм	1600
D (max) обрабатываемых изделий:	
высота центров, мм	315
с подручником, мм	420
над станиной, мм	630
в выемке, мм	1000
Частота вращения шпинделя, об/мин	130, 300, 200,480, 1600,700, 1000, 2500
Конус отверстия пиноли	Морзе 4
Наибольшее перемещение пиноли, мм	120
Мощность электропривода привода, кВт	2,8
Габаритные размеры, мм	2900x860x1400
Масса, кг	1500

Рис. 3. Станок токарный станок ТП 40

Таблица 3

Технические характеристики токарного станка ТП 40

Наибольший диаметр обрабатываемого изделия, мм: -над станиной - над подручником - над выемкой станины	 400 250 600
Наибольшая длина заготовки, устанавливаемой в центрах, мм	1600
Наибольшая длина детали, обтачиваемой в выемке станины, мм	200
Диаметр планшайбы, мм	200; 500
Количество скоростей коробки передач	2
Количество скоростей вращения шпинделя (количество скоростей коробки х количество скоростей двигателя)	2 х 4
Частота вращения шпинделя, об/мин	250, 350, 505, 615, 810, 1010, 1245, 2500
Конус отверстия пиноли	Морзе 3
Наибольшее перемещение пиноли задней бабки, мм	120
Длина линеек подручника, мм	150, 400
Частота вращения электродвигателя, об/мин	700, 900, 1350, 2800
Мощность электродвигателя, кВт	0,8; 1,0; 1,4; 1,5
Габаритные размеры, мм	2600x635x1310
Масса, кг	775

Исследование вибрации и шума коробок скоростей токарных станков. Несмотря на малые мощности привода главного движения станки ТД 20, ТП 40 и ТВ 63 имеют высокие скорости вращения шпинделей от 2150 до 2500 об/мин и поэтому создают повышенные уровни шума на рабочих местах станочников даже на холостом ходу.

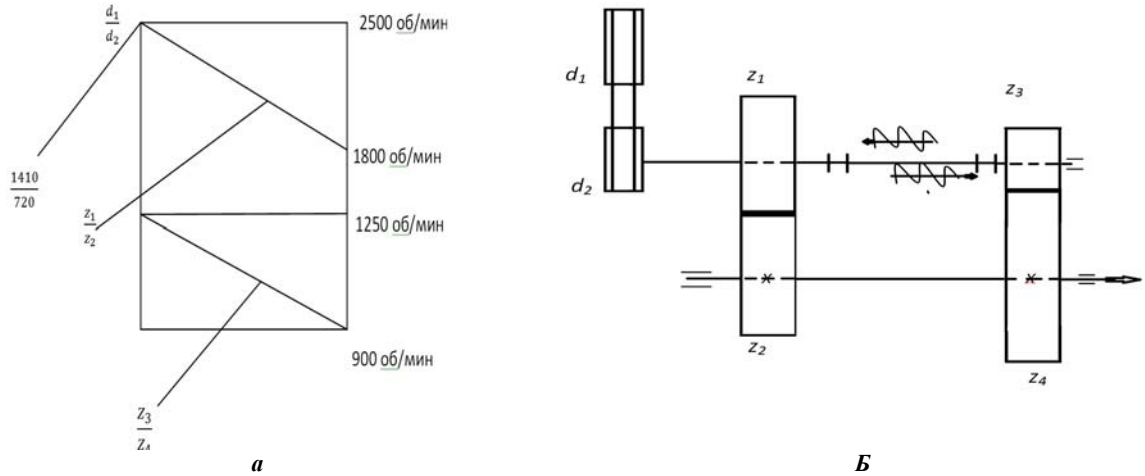
Источником повышенной интенсивности звукового излучения о колебательной системе корпусных и базовых деталей является шпиндельная бабка [1-3].

Из литературных источников известно, что причиной звукового излучения корпуса, который и тому находится в непосредственной близости от рабочего места станочника, являются вибрации, возбуждаемые в кинетической структуре и передаваемые через наружные кольца подшипниковых узлов в корпус [4,5]. Величина вводимой в корпус вибрационной мощности, как причина излучения звуковой энергии, фактически определяется суммой реакций в подшипниках и их виброскоростью [6].

Уменьшить вводимую в корпус бабки вибрационную мощность технически возможно при использовании многоскоростных электродвигателей, что и позволит упростить кинетическую структуру за счет сокращения количества зубчатых передач и соответственно подшипниковых узлов. Наиболее перспективными является двухскоростной двигатель с частотами вращения n =1420/710 об/мин. Для такого варианта коробок скоростей приведены картины скоростей и кинетические схемы [7].

Для станка ТД 20 (рис.1) с четырехскоростной коробкой структурная формула для знаменателя ряда φ = 1,41 картина скоростей и кинетическая схема приведены на рис. 4 к значительным преимуществам предлагаемого варианта является использование электромагнитных муфт, что позволяет переключать частоты вращения, не останавливая станка и исключить механизм переключения зубчатых блоков.

$$z = 4 = z_1.z_2 \qquad \varphi = 1,41$$



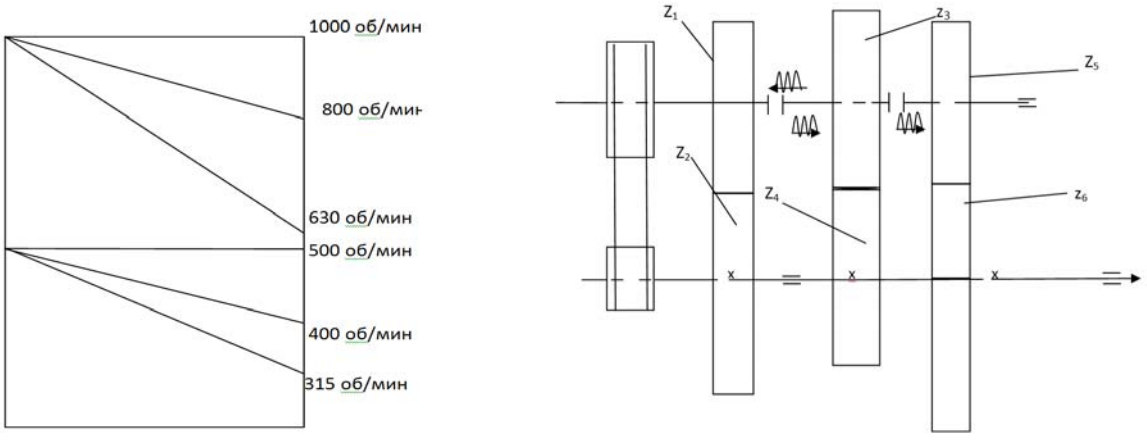
а ***Б***

Рис. 4. Кинетическая структура коробки скоростей станка модели ТД 20: а-коробка скоростей; б-кинетическая схема

16 % по нижние частоты вращения. Такое изменение скорости резания не повлияет на реализацию технологических процессов обработки древесины.

Для станка модели ТП 40 (рис.3) с шестиступенчатым приводом главного разработано два варианта коробки скоростей, которые приведены на рис. 5 и 6.

$$t = 6 = 2_3.3_1 \qquad \varphi = 1,26$$



а ***б***

Рис. 5. Коробка скоростей станка модели ТП 40 с электромагнитными муфтами: а-картина скоростей; б-кинематическая схема

Наличие таких электромагнитных муфт на входном валу коробки может привести к нежелательному увеличению осевых габаритов. Поэтому на рис. 6 представлен компактный вариант с переключающимся подвижным блоком.

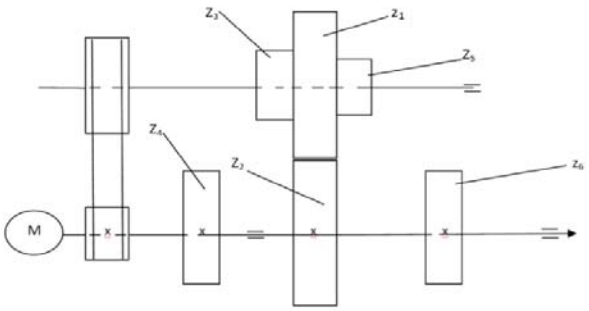


Рис. 6. Кинематическая схема коробки скоростей станка модели ТП 40

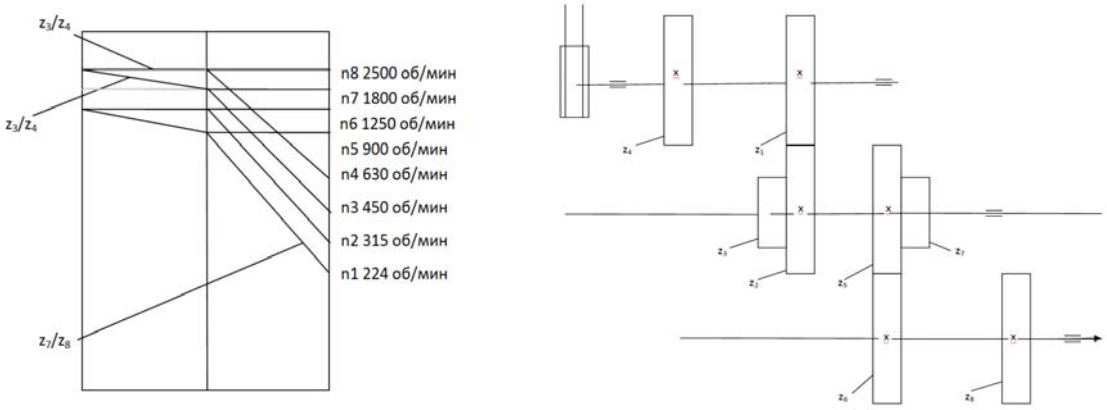
Следует отметить, что при сохранении верхнего значение частоты вращения нижнее увеличено на 20%, что вполне допустимо для черновых операций. К достоинствам данного варианта следует отнести то, что механизм переключения нужен только одного тройного блока.

В восьмиступенчатой коробке станки модели ТВ 63 (рис.2) использование электромагнитных муфт нецелесообразно из-за значительного увеличения осевых габаритов. Картина скоростей и кинетическая схема приведены на рис. 7. Таким образом помимо конструктивных преимуществ, можно предположить, что предлагаемые варианты будут обладать улучшенными виброакустическими характеристиками, т.к. количество элементов ввода в корпус вибрационной мощности уменьшено на 33 %.

Такое уменьшение сопровождается снижением уровня шума на 5 дБ. Ниже приведен теоретический подход к расчету акустических характеристик на примере 4 и 6 ступенчатой коробки. Поскольку оба варианта коробок являются двухвалковыми, то их расчет выполняется с единых позиций.

Корпусные детали коробки передач с любым количеством частот вращения представляют собой полные коробчатые детали по форме близкие к прямоугольным параллелепипедам.

$$z = 8 = 2_2 2_1 2_4 \qquad \varphi = 1{,}41$$



а ***б***

Рис. 7. Кинематическая структура привода главного движения станка ТВ 63: а-картина скоростей; б-кинематическая схема

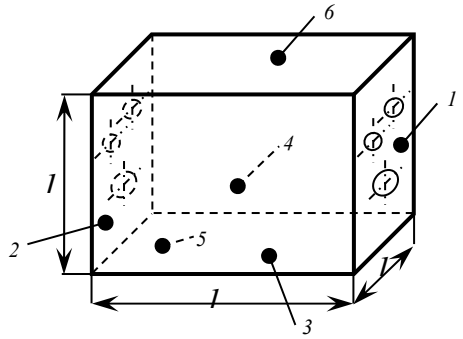


Рис. 8. Расчетная схема корпуса коробки скоростей: 1,2 – правая и левая стенка; 3, 4 – передняя и задняя стенка; 5, 6 – низ и верх

Изучающие звуковую энергию элементы представляют собой плоские пластины ограниченных размеров, а их уровни звуковой мощности определяются как:

$$L_N = 10\lg\frac{\rho_0 c_0 l_1 l_2 \nu_{mn}^2}{10^{-12}} = 10\lg\frac{416\, l_1 l_2 \nu_{mn}^2}{10^{-12}}$$

где ρ_o и c_o – плотность (кг/м^3) и скорость звука в воздухе (м/с); l_1и l_2 - длина и ширина пластины (м); ν_{mn} - скорость колебаний на собственных частотах, м/с.

Расчет скоростей пластинчатых конструкций, представляющих собой энергетически замкнутые системы, основан на системе уравнений энергетического баланса, расчетная схема (рис.8) имеют вид

Расчет акустических характеристик выполняется для максимальных значений сил резания. Снижение уровней шума корпусных деталей коробок передач, обеспечивается уменьшением элементов кинематики.

Вывод. Снижение уровней шума сборных корпусов шпиндельных бабок может быть реализовано виброизоляцией подшипников входного вала. В следствии отсутствия стружки высокой температуры для элементов корпуса таких как передняя и задняя стенки, крышка может быть рекомендован стеклопластик ($\rho = 1700$ кг/м^3; $E = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па; $\eta = 1{,}3 \cdot 10^{-2}$), поскольку стеклопластик имеет коэффициент потерь колебательной энергии значительно больше, чем у чугуна. Использование этого материала приведет к значительному снижению интенсивности звукового излучения корпуса шпиндельной бабки.

Список литературы

1. Безопасность жизнедеятельности: учеб. пособие / И.Г. Переверзев, Т.А. Финоченко, И.А. Яицков [и др.]; ФГБОУ ВО РГУПС. –2-е изд., перераб. и доп. Ростов н/Д, 2019. 308 с.
2. Меехи Б.Ч. Улучшение условий труда операторов металлорежущих и деревообрабатывающих станков за счет снижения шума в рабочей зоне (теория и практика), - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003, - 131 с.
3. Чукарин, А.Н. Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки // Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2004. 152 с.
4. Методика проведения экспериментальных исследований шума прутковых токарных автоматов / Т.А. Финоченко, А.Н. Чукарин // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. / Мин-во промышленности и энергетики. Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2012. С. 263–268.
5. Методика и техническое обеспечение проведения экспериментальных исследований по определению шума на рабочих местах / Т.А. Финоченко, М.В. Баланова, И.А. Яицков // Научно-технический журнал «Труды РГУПС». 2019. №1 (46). С.5-8.
6. Чукарин А.Н., Феденко А.А. О расчете корпусного шума шпиндельных бабок станков токарной группы. Надежность и эффективность станочных и инструментальных систем. - Ростов н/Д, 1993. С. 74-78.
7. Рудиков, Д.А. Повышение точности и надежности привода металлорежущего станка по критерию минимизации погрешности ряда / Д.А. Рудиков, В.А. Финоченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 3. С. 75-83. DOI 10.24412/2071-6168-2023-3-75-84. – EDN NXRNDM.

Абдульманова Кира Игоревна, ассистент, aki.19@yandex.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Ростовский государственный университет путей сообщения,

Финоченко Виктор Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, fin@rgups.ru, Россия, Ростов-на-Дону, Ростовский государственный университет путей сообщения,

Чукарин Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Россия, Ростов-на-Дону, Ростовский государственный университет путей сообщения

THEORETICAL STUDY OF VIBRATION AND NOISE OF GEARBOXES OF WOODWORKING MACHINES WITH DOUBLE-SIDED ELECTRIC MOTORS

K.I. Abdulmanova, V.A. Finochenko, A.N. Chukarin

Despite the low power of the daytime drive, the TD 20, TP 40 and TV 63 lathes have high spindle rotation speeds of 2150 and 2500 rpm (respectively) and therefore create increased noise levels at the machine operators' workplaces even at idle speed. The source of increased intensity of sound radiation from the oscillatory system of body and base parts is the spindle head. The housing parts of the gearbox with any number of rotation speeds are complete box-shaped parts close to rectangular parallelepipeds in shape, and the elements that study sound energy are flat plates of limited dimensions. This article presents the calculation of the speeds of plate structures, which are energetically closed systems. Due to the fact that energetically closed systems have small values of the dissipative function, determined by the vibrational energy loss coefficients, it is proposed to use the energy balance method for such structures to calculate noise levels.

Key words: woodworking lathes, spindle heads, sound pressure, energy balance method.

Abdulmanova Kira Igorevna, assistant, aki.19@yandex.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State Transport University,

Finochenko Viktor Anatolievich, doctor of technical sciences, professor, fin@rgups.ru, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State Transport University,

Chukarin Alexander Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the departmen, Russia, Rostov-on-Don, Rostov State University of Transport

УДК 532.1
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-652-653

ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ НЕФТЯНОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАЗОРАХ ПЛУНЖЕРНЫХ И ЗОЛОТНИКОВЫХ ПАР

С.Н. Редников, Н.Н. Трушин, Д.В. Сычев

В статье представлены результаты экспериментальных исследований в области надежности функционирования систем питания дизельных двигателей и других гидравлических систем. Отмечается, что значительная доля отказов золотниковых и плунжерных пар в насосах высокого давления, форсунках и насос-форсунках возникает вследствие физико-химических процессов, протекающих в зазорах между сопряженными деталями. Исследования показали, что загрязняющие частицы, в частности ферромагнитные, способствуют образованию в дизельном топливе полимерных структур вследствие процессов полимеризации или поликонденсации. Загрязняющие частицы при этом являются центрами образования полимерных структур, резко увеличивая зону физико-химических превращений. При накоплении высокомолекулярных соединений в рабочем зазоре возможно, в случае резкого скачка давления (сотни МПа), образование из них временных или даже постоянных полимерных структур, что может привести к залипанию или заклиниванию золотниковой пары. Также установлено, что процессы поликонденсации и полимеризации могут протекать обратимо или необратимо в зависимости от условий реакции и природы мономеров. Аналогичная ситуация может наблюдаться также для керосина и для многокомпонентных минеральных масел, используемых в качестве рабочих жидкостей гидравлических приводов. Рассмотрены условия проведения экспериментов, схема экспериментальной установки высокого давления. Приведена нелинейная графическая зависимость, которая показывает изменение мощности, потребляемой на перемещение плунжера с ростом давления, и иллюстрируя тем самым нелинейность изменения вязкости рабочей жидкости в зазоре. Представлены графики изменения диэлектрической проницаемости испытуемых жидкостей. Рассмотрено также влияние намагничивания в процессе работы распылителей форсунок топливной аппаратуры дизельных двигателей на количество отказов форсунок. Периодическое размагничивание форсунок способствует снижению отказов топливной аппаратуры. На основе полученных данных могут быть модифицированы регламенты технического обслуживания топливных и гидравлических систем технологических и транспортных машин. Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта ректора ТулГУ для обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам магистратуры, № 8950ГРР_М.

Ключевые слова: гидравлические системы, рабочая жидкость, полимеризация, ресурс, диагностика.

Введение. Одной из проблем, возникающих при эксплуатации гидравлических систем и систем питания дизельных двигателей, а также других двигателей внутреннего сгорания (ДВС), – это проблема выхода из строя плунжерных пар и, в частности, форсунок, насос-форсунок и топливных насосов высокого давления (ТНВД). Традиционно преобладающей причиной отказов является загрязнения, и наиболее часто причиной являются абразивные частицы и вода. Значительная доля отказов плунжерных и золотниковых пар возникает вследствие физико-химических процессов, протекающих в зазорах между сопряженными деталями и приводящих к «склеиванию» последних. Отказы, вызываемые этими процессами, устраняются, как правило, узловой заменой дорогостоящих устройств, что ведёт к значительным организационным, временным и материальным издержкам. Одной из причин резкого изменения состояния жидкости в зазоре между сопряженными деталями, является наличие частиц загрязнителей различной природы [1, 2, 3]. Нерастворимые частицы загрязнителя, находящиеся в рабочей жидкости гидравлических систем или дизельного топлива, отличаются как по своему составу, так и по размерам, а поэтому различается и степень их влияния на работоспособность топливного и гидравлического оборудования. Данные частицы являются своеобразными центрами образования полимерных структур, резко увеличивая зону физико-химических превращений. Естественно, различиями состава и размера обладают и полимерные структуры, возникающие в зазорах прецизионных пар трения, а, следовательно, и их влияние на рабочие характеристики гидравлической системы также различно. Подобные полимерные структуры могут образовываться в результате полимеризации или поликонденсации. Кроме того, даже неполярные молекулы углеводородов способны образовывать граничные зоны, за счёт взаимодействия изомеров [4].

Образующиеся полимерные структуры по времени их существования могут быть как постоянными, так и временными. Исследованиями было также установлено, что процессы поликонденсации и полимеризации могут протекать обратимо или необратимо в зависимости от условий реакции и природы мономеров. Обратимость процесса поликонденсации, прежде всего, обусловлена образованием побочных низкомолекулярных продуктов реакции: воды, аммиака, спирта, хлористого водорода и других веществ, но при процессе обратимой полимеризации побочные продукты не образуются [4]. Наибольший интерес при эксплуатации гидравлических систем в практическом плане представляют ферромагнитные загрязнения, являющиеся, как правило, продуктами коррозии и износа металлических деталей топливной аппаратуры ДВС и оборудования гидравлических приводов. Увеличение концентрации данных частиц в зазоре, даже при условии прохождения их через фильтрующие элементы, задерживающие частицы с размером большим чем 1/3 зазора, как показали натурные эксперименты, связано, в том числе, и с намагничиваемостью плунжерных пар при своей работе. Оказывают своё влияние и присадки, содержащиеся в моторном или гидравлическом масле. При этом в ряде случаев в топливо могут попадать присадки моторного масла.

Многокомпонентные минеральные и полусинтетические масла включают в себя различные углеводородные соединения, обладающие разной молекулярной массой, низкомолекулярная часть которых выступает в роли жидкости носителя и своеобразной смазки для высокомолекулярных соединений, размеры которых зачастую ненамного меньше или даже равны размерам зазоров между прецизионными парами трения. Это особенно опасно при осаждении на частицах в зазорах. Попадание подобных высокомолекулярных частиц совместно с потоком низкомолекулярных соединений в зазоры, например, золотниковых (плунжерных) пар, и последующее вытеснение из зазора низкомолекулярных соединений под действием сдвиговых напряжений, образующихся при перемещениях золотника (плунжера), сопровождается дальнейшим накоплением в зазоре высокомолекулярных соединений, размеры которых близки к размерам самого рабочего зазора золотниковой пары. При накоплении высокомолекулярных соединений в

рабочем зазоре в случае резкого скачка давления возможно, образование из них временных или даже постоянных полимерных структур, что приведет к залипанию или заклиниванию золотниковой пары.

Испытания жидкости давлением. Были проведены исследования поведения жидкости в зазорах плунжерных пар при нагружении их давлением. Испытания на «склеивание» проводились на плунжерных парах насосной установки высокого давления НГР 2000 (рис. 1).

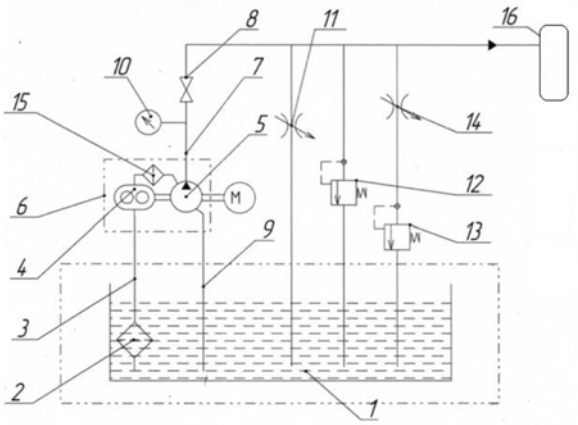


Рис. 1. Схема испытательной установки: 1 – гидробак; 2 – заборный фильтр; 3 – всасывающая гидролиниия; 4 – подпитывающий насос; 5 – главный плунжерный насос; 6 – насосный агрегат; 7 – напорная гидролиния; 8 – вентиль; 9 – дренажная гидролиния; 10 –манометр; 11, 14 – дроссели; 12, 13 – клапаны давления; 15 – промежуточный фильтр; 16 – ресивер

Были получены следующие результаты. Использовались следующие испытуемые жидкости: чистый керосин КТ-1 по ГОСТ 13032, эталонное дизельное топливо по ГОСТ Р 52368-2005 (тип III) при поддержании 7-го класса чистоты по методике NAS. Вплоть до предельных давлений испытаний в 200 МПа схватывания поверхностей плунжерных пар не происходило. При исследовании товарного дизельного топлива категории «летнее», соответствующего ГОСТ 305-82, уже наблюдалось устойчивое «склеивание», или «схватывание», плунжерных пар при давлениях 154-170 МПа только при наличии намагниченной плунжерной пары и внесении 0,001 % от массы исследуемого топлива присадки на основе магнетита (Fe_3O_4).

Совершенно иная ситуация выявилась при добавлении индустриального масла в исследуемые составы. Добавки масел, моторного М8 и индустриального И-20, в концентрациях от 0,1 % до 1 % при давлениях ниже 30 МПа ни на одном из исследуемых топлив при обеспечении заданной чистоты исследуемой жидкости схватывания не наблюдались. При испытании керосина ТК-1 наблюдалось устойчивое схватывание плунжерных пар при давлении 140-160 МПа при наличии концентрации масла выше 0,1 % от массы жидкости [5]. Но при этом корреляции изменения давления схватывания от концентрации присадки выявить не удалось, при изменении концентрации менялась наработка до схватывания плунжерных пар, при этом при меньшей концентрации схватывание происходило, как правило, при наработке 2-2,5 час. Минимальное время до схватывания наблюдалось при концентрациях 0,7 % и составляло 32 с при давлении155 МПа. Внесение присадки на основе магнетита (Fe_3O_4) при концентрации 0,001 % (фильтр с тонкостью фильтрации 3 мкм пропускал до 90% данного вещества, магнитный сепаратор был демонтирован) при наличии намагниченной плунжерной пары сократило время схватывания при малых концентрациях до 400-700 секунд, уровни давлений схватывания в диапазоне 140-160 МПа не подчинялись нормальному распределению. Сходная картина наблюдалась и при работе на дизельном топливе ГОСТ Р 52368-2005 (тип III) с загрязнителями. Исследования показали в целом сходный характер поведения, но начальная зона схватывания оказалась на границе 135 МПа.

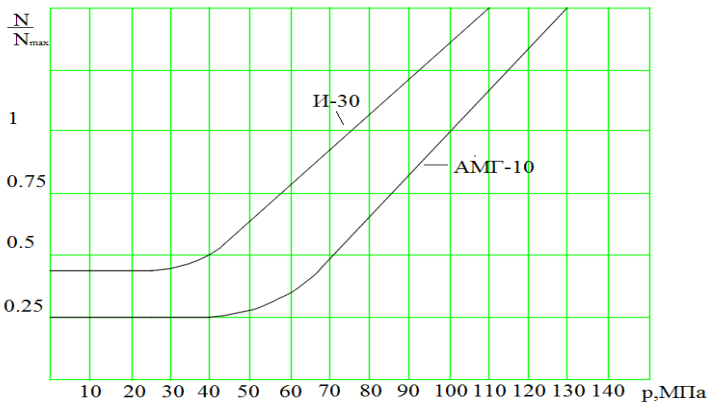


Рис.2. Зависимость потребляемой системой мощности от рабочего давления

Далее приведены результаты исследования поведения жидкости в зазорах плунжерных пар при нагружении гидростатическим давлением. Исследовался характер изменения мощности, требуемого для перемещения плунжера при работе плунжерной пары в зоне гидростатического давления. Чистота рабочей жидкости обеспечивалась

предварительной фильтрацией до 8-го класса чистоты по NAS. На основании полученных экспериментальных данных была построена графическая зависимость, изображенная на рис. 2. На графике представлены кривые для двух марок минеральных масел: И-30 с номинальной кинематической вязкостью 30 сСт при температуре 50ºС и АМГ-10 с номинальной кинематической вязкостью 10 сСт при той же температуре.

Данная графическая зависимость показывает нелинейность изменений мощности, потребляемой гидравлической системой для осуществления перемещения золотника (плунжера) с ростом давления в системе, иллюстрируя тем самым нелинейность изменения вязкости рабочей среды в зазоре. Причём аномального изменения вязкости в большом объёме этой же среды не зафиксировано. Из проведенного исследования становится очевидным, что игнорирования процессов полимеризации рабочей среды в пристеночной зоне зазоров золотников недопустимо, а поэтому этот факт следует учитывать в процессах проектирования и эксплуатации топливных систем ДВС и аппаратуры гидравлических приводов. Тем более, что наблюдается тенденция создания гидроприводов машин с номинальным рабочим давлением порядка 50 МПа [6].

Для подтверждения версии о прохождении физико-химических процессов в зазоре была поставлена серия экспериментов по определению диэлектрической проницаемости. Замеры производились для индустриального масла И-30 при зазоре 1 мм и при зазоре 10 микрон. Результаты измерений представлены на рис 3 и рис. 4. Графики показывают, что изменение диэлектрической проницаемости имеет нелинейный характер с четким экстремумом. Эти обстоятельства могут также служить критериями для оценки степени загрязненности масла и топлива ДВС [7].

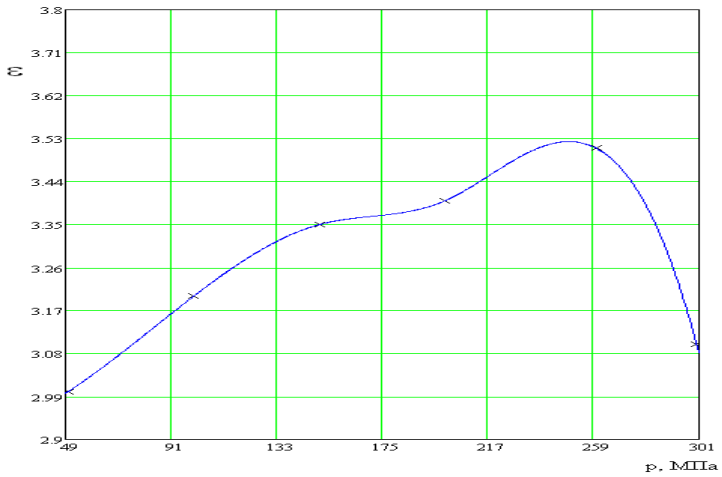


Рис. 3 Изменение диэлектрической проницаемость жидкости в объёме

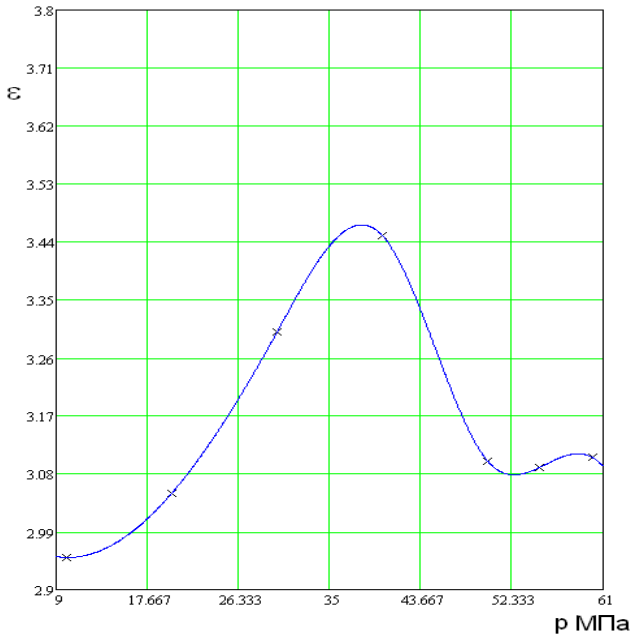


Рис. 4. Изменение диэлектрической проницаемость в зазоре 10 микрон

Необходимо также отметить что величина диэлектрической проницаемости жидкости в малом зазоре значительно зависела не только от давления, но и от времени выдержки. Данные, которые приведены выше, соответствуют времени выдержки 30 мин. Зона изменения проницаемости качественно совпадает с зоной возрастания трения в зазоре [8, 9].

Результаты испытаний форсунок. Одним из простых и дешёвых способов снижения вероятности схватывания плунжерных пар при функционировании топливных систем дизельных двигателей является периодическое

размагничивание последних. Учитывая особенности технического обслуживания топливных систем ДВС, данное мероприятие целесообразно осуществлять как элемент планового обслуживания через 4-6 тыс. часов наработки, или по достижению предельного значения магнитной индукции не более 0,3 мТл, так как было установлено, что именно в этом диапазоне намагниченности фиксировалось скачкообразное сокращение времени схватывания плунжерных пар.

При испытании форсунок производилось обслуживание их распылителей безштифтового типа. Обслуживание производилось с интервалами в 6 тыс. часов наработки, контрольная группа форсунок функционировала до отказа. На рис. 5 приведена статистика отказов по причинам схватывания иглы форсунки и нарушения ее подвижности.

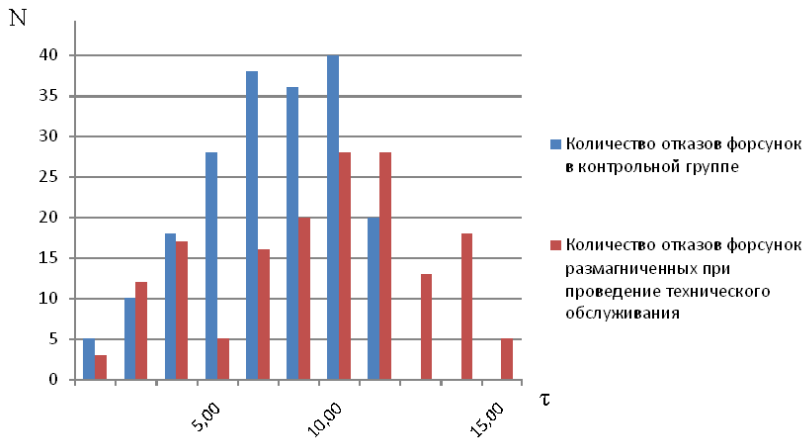


Рис. 5. Результаты испытаний распылителей форсунок

При проведении периодического обслуживания производилась разборка форсунки, промывка в ультразвуковой ванне, размагничивание, проверка на герметичность и регулировка давления открытия. Форсунки, не прошедшие проверку на качество распыла, при анализе не учитывались. Контрольная группа проверялась на качество распыла, герметичность и давление открытия. Отбракованные по этим признакам распылители форсунок из выборок исключались. Оценка схватывания форсунок осуществлялось при разборке, неисправность типа нарушение подвижности иглы фиксировалась по осциллограммам компьютерного дизель-тестера МТ10Д. Состояние фильтрующих элементов оценивалось по перепаду давлений на индикаторе загрязнения. Фильтрующие элементы были штатные, новые, имели номинальную тонкость фильтрации 5,5 мкм. Анализ статистических данных показал, что рассмотренные группы форсунок после проведения первого обслуживания относятся к разным выборкам, причём группа распылителей прошедшая размагничивание показывала меньшее количество отказов при более длительном сроке службы. Этот результат показывает высокую эффективность предложенной методики обслуживания элементов плунжерных пар.

Заключение. Проведенные эксперименты по изучению свойств технических жидкостей и смазочных материалов по контролю диэлектрической проницаемости в зазорах 2-100 мкм при динамическом изменении давления до 200 МПа позволили уточнить представления о физико-химических процессах, происходящих в указанных зазорах. Результаты экспериментов позволили также определить критические параметры функционирования гидравлических аппаратов и машин с учётом специфики накопления продуктов износа и изменения геометрических параметров зон трения. На основании полученных данных могут быть модифицированы правила технического обслуживания топливных и гидравлических систем технологических и транспортных машин, а также предложены новые методы и средства оперативной диагностики технических жидкостей. Возможно, что для принудительного разрушения мономеров и полимеров, образующихся в технических жидкостях, может быть использован эффект гидродинамической кавитации.

Список литературы

1. Коновалов В.М., Скрицкий В.Я., Рокшевский В.А. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков. М.: Машиностроение, 1976. 288 с.
2. Бродский Г.С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин. М.: «Журнал «Горная промышленность» (Издатель НПК ГЕМОС Лтд.)», 2003. 360 с.
3. Фитч Дж., Тройер Д. Анализ масел. Основы и применение / Пер. с англ. 2-го изд.; под ред. Е.А. Новикова, М.В. Кирюхина. СПб.: ЦОП «Профессия», 2015. 176 с.
4. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
5. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство. Учеб. пособие для вузов / Б.Н. Никольский, Н.А. Смирнова, М.Ю. Панов [и др.]. Под ред. Б.П. Никольского. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1987. 880 с.
6. Сычев Д.В., Трушин Н.Н. Станочные гидроприводы – итоги и перспективы // Вестник ТулГУ. Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических процессов: сб. научных трудов Всеросс. научно-техн. конф. Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. С. 195-202.
7. Трушин Н.Н., Сычев Д.В. Микроконтроллерный прибор диагностики загрязненности минерального масла // Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: Материалы IX Междунар. научно-практич. конференции-конкурса. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2022. С. 152-156.

8. Rednikov S.N., Akhmedyanova E.N., Zakirov D.M. Comprehensive Diagnostics of the State of Metallurgical Equipment // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. P. 1205–1211.

9. Использование комплексного подхода в диагностике гидравлических систем металлургического оборудования / С.Н. Редников, Д.М. Закиров, Е.Н. Ахмедьянова, К.Т. Ахмедьянова // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 10 (88). С. 8-11.

Редников Сергей Николаевич, д-р техн. наук, доцент, srednikov@mail.ru, Россия, Москва, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.Е. Тимирязева,

Трушин Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, trushin@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сычев Денис Викторович, магистр, denis9202711614@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

POLYMERIZATION OF LIQUID OIL PRODUCTS IN PLUNGER ANNULAR GAPS

S.N. Rednikov, N.N. Trushin, D.V. Sychev

This is an experimental study of the reliability of diesel engine fuel systems and other hydraulic systems. A significant number of spool and plunger failures in high pressure pumps, injectors, and injector pumps are caused by the physical and chemical processes occurring in the annular gaps. We have found that contaminating particles, particularly ferromagnetic particles, contribute to the formation of polymer structures in diesel fuel through polymerization or polycondensation processes. The contaminating particles become the nuclei of polymeric structures, greatly increasing the area of physical and chemical transformations. As high-molecular compounds are deposited in the annular gap, a pressure surge (hundreds of MPa) can lead to the formation of temporary or even permanent polymer structures from such compounds and subsequent sticking or jamming of components. It has also been found that polycondensation and polymerization can be either reversible or irreversible depending on the reaction conditions and the nature of the monomers. A similar situation can be observed with kerosene and multi-component mineral oils used as hydraulic fluids. We presented the test procedures and the high pressure test rig setup. We plotted a nonlinear plunger motion energy vs. pressure curve, indicating the nonlinearity of fluid viscosity changes in the annular gap, and the dielectric curves. We also studied the effect of diesel engine injector magnetization on injector failure rate. Regular demagnetization reduces the failure rate. The results may be useful in the development of maintenance schedules for fuel and hydraulic systems. This study is a part of the MSc research project supported by a grant of Tula State University Chancellor at the contest of 2022, No 8950ГРР_М.

Key words: hydraulic systems, hydraulic fluid, polymerization, service life, diagnostics.

Rednikov Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, docent, srednikov@mail.ru, Russia, Moscow, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,

Trushin Nikolay Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, trushn@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Sychev Denis Vicktorovich, student, denis9202711614@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.757
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-656-657

ДИАГРАММА ЗАКЛИНИВАНИЯ НЕЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКЕ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЗИЦИОННО СИЛОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

М.В. Вартанов, Е.А. Коган, Нгуен Ван Линь, Дао Ван Луу

При разработке технологии роботизированной сборки необходимо определить условия заклинивания деталей. Разработана математическая модель роботизированной сборки, необходимая для идентификации положения вала по сигналам с силомоментного датчика. Полученные аналитические решения позволили определить условия возникновения заклинивания упругого вала при двухточечном контакте в процессе сопряжения вала с жесткой втулкой. Расчетные и экспериментальные значения момента позволяют корректировать программную траекторию выходного звена робота в процессе сопряжения.

Ключевые слова: роботизированная сборка; силомоментный датчик; условия заклинивания; нежесткие детали; диаграмма заклинивания.

Процесс сборки цилиндрических соединений является типовой задачей в машиностроении. Исследования обычно проводились на деталях, которые рассматривались как абсолютно твердое тело. Однако в последние годы в различных машинах и механизмах применяется все больше гибких и нежестких деталей. Процесс сборки фактически представляет собой динамическую настройку в условиях геометрических и силовых ограничений. Если эти ограничения не являются корректными, то могут возникать неблагоприятные ситуации, такие как заедание и заклинивание [1]. Для того, чтобы прогнозировать успешность реализации сборочной операции, следует рассматривать не

только геометрические параметры деталей, но и условия контактного взаимодействия непосредственно в сборочной зоне. Заклинивание – это состояние, при котором вал неподвижен вследствие того, что внешние силовые воздействия на вал в осевом направлении не превосходят сил сопротивления в контактной зоне. Соотношения между силовыми факторами, при которых возникает заклинивание абсолютно жестких деталей, впервые были сформулированы Simunovic S. [2-5]. Во избежание заклинивания жесткого вала при его двухточечном контакте со втулкой следует соблюдать неравенства:

$$\begin{cases} \left|\dfrac{F_X}{F_Z}\right| \le \dfrac{1}{\mu} \\ \left|\dfrac{M}{(rF_Z)} + \dfrac{\mu(1+\lambda)F_X}{F_Z}\right| \le \lambda \end{cases} \tag{1}$$

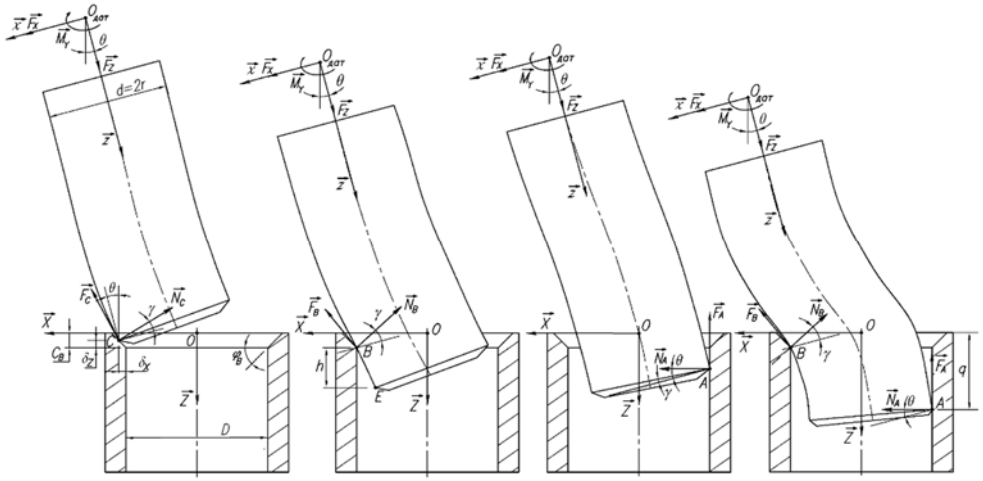
где $\lambda=l/(2r\mu)$ - безразмерная глубина сопряжения, $2r$ - диаметр вала, μ - коэффициент трения; l – длина зоны сопряжения деталей, F_X, F_Z, M - компоненты внешних усилий и момента, приложенных к валу.

В работе [6] анализ условий заклинивания абсолютно жестких цилиндрических деталей проводился с использованием сигналов, полученных с силомоментного датчика, установленного на промышленном роботе. В работах [7, 8] представлен анализ сил и моментов при заклинивании трехмерного механизма с двойным штифтом в отверстии. Анализ был основан на геометрических соотношениях и априорном знании состояний контакта без проведения аналитических расчетов.

В данной работе получено аналитическое описание условий сопряжения, возникающих при установке нежесткого вала во втулку в момент двухточечного контакта.

Адекватность предложенной математической модели подтверждена экспериментальным анализом условий заклинивания и количественной оценкой зависимости условий заклинивания от изгибной жесткости вала.

В качестве устанавливаемой детали рассматривается упругий цилиндрический вал круглого сечения с постоянной изгибной жесткостью, изготовленный из пластика (литейный фторопласт Ф4). Длина вала существенно больше его диаметра. В процессе установки нежесткого вала в жесткую втулку целесообразно рассмотреть три последовательные стадии процесса сопряжения (рис. 1): контакт по фаскам; одноточечный контакт; двухточечный контакт.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Схема действия сил на этапах сопряжения: а – контакт по фаскам; б, в – одноточечный контакт; г – двухточечный контакт

Заклинивание, как правило, происходит на этапе двухточечного контакта. Рассмотрим контактную ситуацию на данном этапе сопряжения. На данном этапе нежесткий вал подвергается воздействию продольной сжимающей силы, приложенной со стороны схвата робота, а на другом торце - воздействию поперечных сил реакции, что приводит в общем случае к продольно-поперечному изгибу вала (рис. 2). Пусть точка *A* соответствует контакту торца вала и стенки втулки, а точка *B* соответствует контакту фаски втулки и цилиндрической поверхности вала. В точке контакта *A* приложены нормальная сила $\vec{\mathbf{N}}_\mathbf{A}$ и сила трения $\vec{\mathbf{F}}_\mathbf{A}$. В точке контакта В приложены нормальная сила $\vec{\mathbf{N}}_\mathbf{B}$ и сила трения $\vec{\mathbf{F}}_\mathbf{B}$. Контактное взаимодействие определяет сборочные силы F_X, F_Z и момент M_Y в центре подвижной системы координат $O_{\text{дат}}$. Силы реакции определяются из условий равновесия по теореме о сходящихся силах [9].

Как показано на рисунке 2, начало подвижной (локальной) системы координат совпадает с центральной точкой датчика $O_{\text{дат}}$, ось $O_{\text{дат}}z$ совпадает с продольной осью схвата, а $O_{\text{дат}}x$ выбирается так, чтобы вал и втулка были симметричны относительно плоскости $O_{\text{дат}}xz$. Поворачивая $\overline{[R_1]}$ на угол θ относительно прямой, проходящей через $O_{\text{дат}}$ с направляющим вектором $\vec{\mathrm{z}}$ и получим $\overline{[R]}$ [12]. Из решения методом начальных параметров задачи о продольно–поперечном изгибе упругого вала известно выражение для прогиба упругого вала в точке *B* [10]:

$$\Delta x_B = x(z_B) = x_0''(1-\cos k\,z_B) + x_0'(kz_B - \sin k\,z_B). \tag{2}$$

При этом угол поворота поперечного сечения равен:

$$\gamma = x'(z_B) = x_0''k\sin k\,z_B + kx_0'(1-\cos k\,z_B). \tag{3}$$

Уравнения мгновенного (квазистатического) равновесия деформированного вала под действием приложенных к нему внешних сил и сил реакции в случае двухточечного контакта (в точках *A* и *B*) имеют вид [12]:

$$\begin{cases} \sum F_{\mathrm{kZ}} = -F_A - N_A\theta - N_B\gamma - F_B + F_Z = 0 \\ \sum F_{\mathrm{kX}} = -F_A\theta + N_A - N_B + F_B\gamma + F_X = 0 \\ \sum M_{O_{\text{дат}}}(F_k) = F_A(z_A\theta + x_A) - N_A(z_A - x_A\theta) + \\ +N_B(z_B - x_B\gamma) - F_B(z_B\gamma + x_B) - M_Y = 0 \end{cases} \quad (4)$$

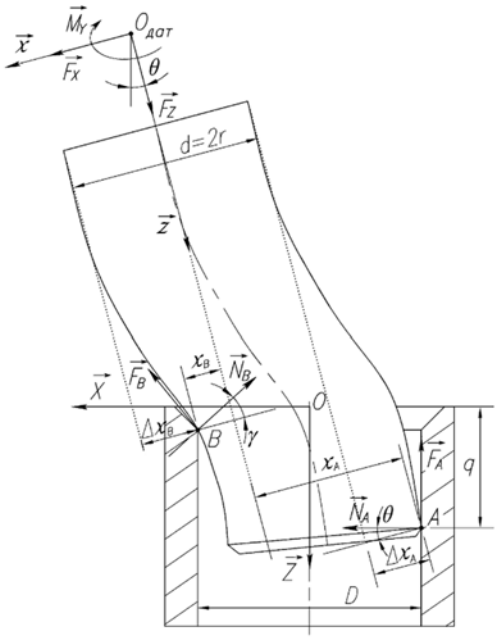


Рис. 2. Схема действия сил на вал при двухточечном контакте

Разрешая первые два уравнения системы (4), находим значения реакций N_A и N_B:

$$N_B = \frac{F_X(\mu+\theta)+F_Z(1-\mu\theta)}{(\theta+\mu)(1-\mu\gamma)+(\mu+\gamma)(1-\mu\theta)} \quad (5)$$

$$N_A = -\frac{F_X(\gamma+\mu)-F_Z(1-\mu\gamma)}{(\theta+\mu)(1-\mu\gamma)+(\mu+\gamma)(1-\mu\theta)} \quad (6)$$

Определим координаты точки B в локальной системе координат

$$x_B = r - [x_0''(1 - \cos k\, z_B) + x_0'''(kz_B - \sin k\, z_B)]. \quad (7)$$

Точка B является фиксированной точкой в глобальной системе координат OXYZ. В общем случае, если предположить, что угол θ мал, то имеем [12]:

$$x_B = X_B - X_{O_{дат}} + z_B\theta \quad (8)$$

$$z_B = Z_B - Z_{O_{дат}} - x_B\theta \quad (9)$$

Преобразуя уравнения (8), получим углы поворота поперечного сечения в точке A (данный угол определяет также перекос деталей в процессе соединения):

$$\theta = \frac{X_{O_{дат}} - X_B + r - x(z_B)}{z_B} = \frac{X_{O_{дат}} - X_B + r - [x_0''(1-\cos kz_B) + x_0'''(kz_B - \sin kz_B)]}{z_B} = \frac{\theta_B^*}{z_B} \quad (10)$$

где $\theta_{\mathrm{B}}^* = X_{\mathrm{O_{дат}}} - X_B + r - [x_0''(1 - \cos k\, z_B) + x_0'''(kz_B - \sin k\, z_B)]$; r– радиус вала.

Подставляя (8) и (10) в (9), получим уравнение относительно z_B:

$$z_B^2 + \left(Z_{O_{дат}} - Z_B\right)z_B + \left(X_{O_{дат}} - X_B\right)\theta_B^* + \theta_B^{*2} = 0. \quad (11)$$

Уравнение (11) представляет собой квадратное алгебраическое уравнение относительно z_B, точное решение которого имеет вид:

$$(z_B)_{1,2} = \frac{Z_{O_{дат}} - Z_B \pm \sqrt{\Delta}}{2}, \quad (12)$$

где $\Delta = (Z_{O_{\text{дат}}} - Z_B)^2 - 4\left[(X_{O_{\text{дат}}} - X_B)\theta_{\mathrm{B}}^* + \theta_{\mathrm{B}}^{*2}\right]$.

Пусть X_A – координаты точки A в абсолютной системе отсчета. Во время сопряжения X_A является константой. Таким образом:

$$X_A = X_{O_{дат}} + x_A - z_A\theta; \quad (13)$$

$$D = X_B - X_A \Rightarrow X_A = -\frac{D}{2}, \quad (14)$$

где D– диаметр втулки.

Уравнения (13) и (14) позволяют получить

$$x_A = z_A\theta + X_B - D - X_{O_{дат}}. \quad (15)$$

Из геометрических соотношений (рис. 2), получаем координаты точки A

$$z_A \approx \frac{q}{\cos\theta} + z_B \approx \frac{q}{\theta} + \frac{Z_B - Z_{O_{дат}} \pm \sqrt{\Delta}}{2}. \quad (16)$$

Приведенные соотношения позволяют найти все параметры, определяющие состояние нежесткого вала при сопряжении со втулкой и проверить выполнение условий скольжения и заклинивания вала при сборке.

Из условий квазистатического равновесия (4) следует:

$$\begin{cases} F_Z = N_A(\mu+\theta) + N_B(\gamma+\mu) \\ F_X = N_A(\mu\theta-1) + N_B(1-\mu\gamma) \\ M_Y = N_A[\mu(z_A\theta + x_A) - (z_A - x_A\theta)] + \\ \quad + N_B[(z_B - x_B\gamma) - \mu(z_B\gamma + x_B)] \end{cases} \tag{17}$$

Как видно из уравнений (17), F_X, F_Z и M_Y являются линейными функциями N_A и N_B.

Чтобы корректно описать состояние двухточечного контакта, важно установить взаимосвязь между состоянием одноточечного контакта и состоянием двухточечного контакта. Так как процесс сопряжения детали со втулкой является непрерывным, то соотношения для одноточечного контакта должны получаться как предельные случаи из соотношений для двухточечного контакта.

Докажем справедливость следующего утверждения: соотношение сил и моментов в состоянии равновесия при двухточечном контакте может быть представлено линейной функцией двух предельных состояний одноточечного контакта.

Чтобы установить этот предельный переход, выполним следующее преобразование уравнений (17), записав их в виде:

$$F_Z = k_{Z_1}N_A + k_{Z_2}N_B;\ F_X = k_{X_1}N_A + k_{X_2}N_B;\ M_Y = k_{M_1}N_A + k_{M_2}N_B \tag{18}$$

где $k_{Z_1} = \mu+\theta, k_{Z_2} = \gamma+\mu;\quad k_{X_1} = \mu\theta - 1, k_{X_2} = 1-\mu\gamma;\quad k_{M_1} = \mu(z_A\theta + x_A) - (z_A - x_A\theta);\quad k_{M_2} = (z_B - x_B\gamma) - \mu(z_B\gamma + x_B)$.

Тогда соотношения сил и моментов в общем случае двухточечного контакта могут быть представлены в виде:

$$\frac{F_X}{F_Z} = \frac{k_{X_1}N_A + k_{X_2}N_B}{k_{Z_1}N_A + k_{Z_2}N_B} \tag{19}$$

$$\frac{M_Y}{rF_Z} = \frac{1}{r\Delta_0}\left[-\left(\frac{k_{Z_2}}{k_{Z_1}} - \frac{k_{M_2}}{k_{M_1}}\right)\frac{k_{M_1}}{k_{X_1}}\frac{F_X}{F_Z} + \left(\frac{k_{X_2}}{k_{X_1}} - \frac{k_{M_2}}{k_{M_1}}\right)\frac{k_{M_1}}{k_{Z_1}}\right] \tag{20}$$

или:

$$\frac{M_Y}{rF_Z} = -a\frac{F_X}{F_Z} + b \tag{21}$$

где $\Delta_0 = \frac{k_{X_2}}{k_{X_1}} - \frac{k_{Z_2}}{k_{Z_1}}$; $a = \left(\frac{k_{Z_2}}{k_{Z_1}} - \frac{k_{M_2}}{k_{M_1}}\right)\frac{k_{M_1}}{(k_{X_1}r\Delta_0)}$; $b = \left(\frac{k_{X_2}}{k_{X_1}} - \frac{k_{M_2}}{k_{M_1}}\right)\frac{k_{M_1}}{k_{Z_1}r\Delta_0}$

Из (21) следует, что в координатах F_X/F_Z, M_Y/rF_Z выражение (21) действительно представляет собой линейную функцию.

Если контакт одноточечный в точке B (рис 1б), то при k_{Z_1}, k_{X_1}, k_{M1} равных нулю, получим:

$$\frac{F_X}{F_Z} = \frac{k_{X_2}}{k_{Z_2}} = \frac{1-\mu\gamma}{\gamma+\mu};\ \frac{M_Y}{rF_Z} = \frac{k_{M_2}}{rk_{Z_2}} = \frac{(1-\mu\gamma)z_B}{r(\gamma+\mu)} - \frac{x_B}{r} \tag{22}$$

Аналогично, для случая одноточечного контакта в точке A (рис. 1в), если $k_{Z_2}, k_{X_2}, k_{M_2}$ равны нулю, то:

$$\frac{F_X}{F_Z} = \frac{k_{X_1}}{k_{Z_1}} = -\frac{1-\mu\theta}{\theta+\mu};\ \frac{M_Y}{rF_Z} = \frac{k_{M_1}}{rk_{Z_1}} = -\frac{(1-\mu\theta)z_A}{r(\theta+\mu)} + \frac{x_A}{r} \tag{23}$$

Малость углов γ и θ позволяет получить оценку параметров, входящих в уравнение (20): $\frac{k_{X_2}}{k_{X_1}} < 0$, $\frac{k_{Z_2}}{k_{Z_1}} > 0$, $\frac{k_{M_2}}{k_{M_1}} < 0$.

Поэтому возможные предельные случаи левостороннего и правостороннего одноточечных контактов в зависимости от знака b определят предельные точки (вершины) диаграммы заклинивания, а отрезки, их соединяющие, описывают состояние равновесия при двухточечном контакте. Точки и отрезки образуют замкнутую область, которая делит всю плоскость на две части: внешнюю и внутреннюю области. Внешние области соответствуют состоянию заклинивания, поскольку возникающие в точках контакта силы реакции, моменты и силы трения превосходят силы, приложенные к детали со стороны робота [2,3,4,7] Внутренняя область параллелограмма характеризует собой состояния, при которых сборка обеспечивается. На рисунке 3 представлена диаграмма заклинивания при сопряжении нежесткого вала с жесткой втулкой.

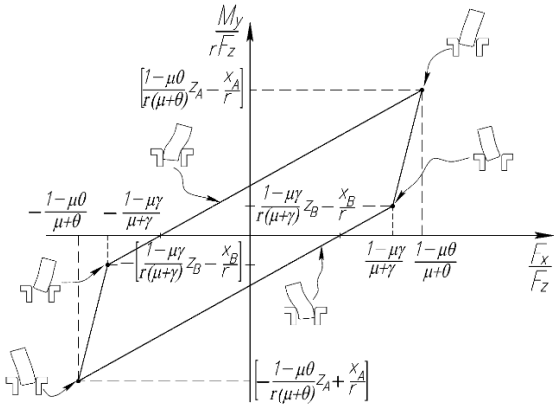


Рис. 3. Диаграмма заклинивания при соединении нежесткого вала

Так как параметры z_B, x_B и z_A, x_A, относящиеся к глубине сопряжения и положению детали, не являются постоянными, то диаграммы заклинивания отражают непрерывный характер процесса сборки. В ходе экспериментов измеренные величины силы/момента должны сравниваться с расчетными диаграммами заклинивания, в результате чего будут формироваться параметры управления.

Таким образом, чтобы избежать заклинивания нежесткого вала, следует поддерживать соблюдение условий:

$$\begin{cases} \left|\frac{F_X}{F_Z}\right| < \frac{1-\mu\gamma}{\gamma+\mu} = f(\gamma) \\ b' = \left|\frac{M_Y}{rF_Z} + a\frac{F_X}{F_Z}\right| < b \end{cases} \quad (24)$$

Полученные условия являются обобщением условий заклинивания Simunovic S. [2] для жесткого вала.

Действительно, первое условие (24) при γ =0 приводится к соотношению (1). Второе условие в системе (1) следует из приближенных уравнений равновесия сил при двухточечном контакте абсолютно жесткого стержня, полученных в предположении, что вследствие малости угла θ наклона детали к продольной оси втулки его можно принять равным нулю [2]. При таком условии уравнения равновесия (4) будут совпадать с уравнениями равновесия, приведенными в [5]. Поэтому и второе условие (24) в предельном случае абсолютно жесткого стержня (при $E \to \infty$, $k \to 0$) приводится ко второму соотношению (1).

Заметим, что при использовании силомоментного датчика показания снимаются в виде сил и моментов, направленных вдоль трех осей системы координат: ось $O_{дат}z_{дат}$ направлена вдоль оси вала, а оси $O_{дат}x_{дат}$ и $O_{дат}y_{дат}$ ей перпендикулярны и лежат в плоскости поперечного сечения оси вала. С силомоментного датчика фактически снимаются проекции вектора силы на оси координат F_{X1}, F_{Y1}, F_{Z1} и проекции вектора момента M_{X1}, M_{Y1}, M_{Z1} (рис. 4). Для решения поставленной задачи необходимо представить силу в виде двух составляющих: осевой $\vec{\mathbf{F}}_\mathbf{Z}$ и радиальной $\vec{\mathbf{F}}_\mathbf{X}$, лежащей в плоскости контакта [11]

$$\vec{F}_Z = \vec{k}_1 F_{Z1} \quad (25)$$

где $\vec{\mathbf{k}}_\mathbf{1}$ – орт оси $O_{дат}z_{дат}$.

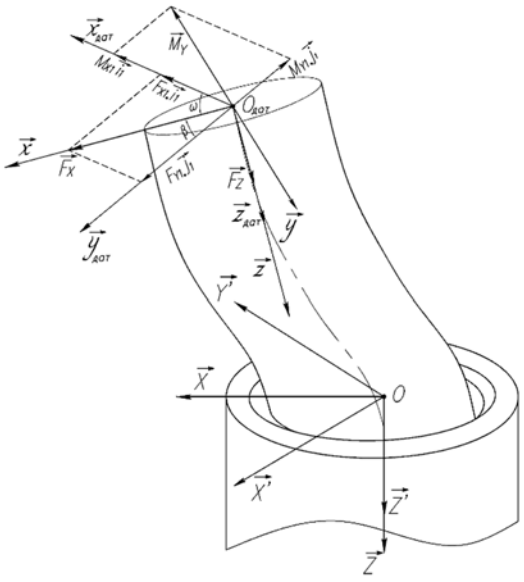


Рис. 4. Схема сил и моментов, действующих на нежесткий вал в системе координат силомоментного датчика

Модуль силы $\vec{\mathbf{F}}_\mathbf{X}$ можно определить как

$$F_X = \sqrt{F_{X1}^2 + F_{Y1}^2} \quad (26)$$

Направление вектора $\vec{\mathbf{F}}_X$ определяется направляющими косинусами углов между вектором силы и положительными направлениями осей координат, которые определяют положение точек контакта *A* и *B* относительно осей $O_{дат}x_{дат}$ и $O_{дат}y_{дат}$.

Аналогичным образом определяем вектор момента. Получив с датчика проекции M_{X1}, M_{Y1} вектора $\overrightarrow{\mathbf{M}}_\mathbf{Y}$, можно вычислить его модуль [11]:

$$M_Y = \sqrt{M_{X1}^2 + M_{Y1}^2} \quad (27)$$

Предположим, что в результате расчетов установлено, что необходимо повернуть вал вокруг оси $O_{дат}y_{дат}$ на угол поворот θ. Тогда с помощью направляющих косинусов данный поворот представим угловыми перемещениями вокруг осей $O_{дат}x_{дат}$ и $O_{дат}y_{дат}$:

$$\theta_{X1} = \theta\, cos\left(\vec{M}_Y, \vec{\imath}_1\right) = \theta\frac{M_{X1}}{M_Y}; \theta_{Y1} = \theta\, cos\left(\vec{M}_Y, \vec{\jmath}_1\right) = \theta\frac{M_{Y1}}{M_Y} \quad (28)$$

Система координат *OX'Y'Z'* — это система координат, которая постоянно связана со втулкой и первоначально задается при настройке инструмента. Координаты центра силомоментного датчика в двух системах координат *OX'Y'Z'* и *OXYZ* определяются системой уравнений:

$$\begin{cases} \Delta_\Sigma = \left|X_{O_{дат}}\right| = \sqrt{X'^2_{O_{дат}} + Y'^2_{O_{дат}}} \\ Z_{O_{дат}} = Z'_{O_{дат}} \end{cases} \quad (29)$$

Направляющие косинусы позволяют определить корректирующее перемещение вала в системе координат $O_{дат}x_{дат}y_{дат}$. Предположим, что в результате расчетов необходимо переместить вал вдоль оси $O_{дат}x$ на величину Δ∑

(проекция вектора перемещения на ось, которая может быть как отрицательной, так и положительной), тогда проекции вектора перемещения на оси $O_{дат}x_{дат}$ и $O_{дат}y_{дат}$ определяются выражениями:

$$\Delta_{\Sigma X1} = \Delta_{\Sigma} \frac{F_{X1}}{F_Y};\ \Delta_{\Sigma Y1} = \Delta_{\Sigma} \frac{F_{Y1}}{F_Y} \tag{30}$$

Для проведения экспериментов создана экспериментальная установка, оснащенная силомоментным датчиком FTN-AXIA80 SI500-20 Ethernet (рис. 5).

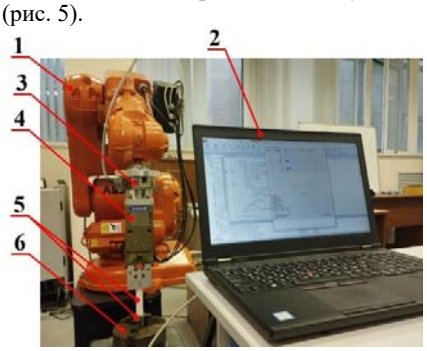


Рис. 5. Экспериментальная установка для исследования роботизированной сборки: 1 – промышленный робот ABB IRB 140T; 2 – персональный компьютер; 3 – силомоментный датчик FTN-AXIA 80 SI500-20; 4 – схват Schunk GSM-P 64 E-180; 5 – экспериментальные образцы; 6 – базовое приспособление

Установка смонтирована на базе промышленного робота IRB-140T с контроллером IRC5. Сопрягаемые цилиндрические детали вал и втулка жёстко базируются в схвате робота 4 и сборочном приспособлении 6. Информация о возникающих в зоне сборки силах и моментах поступает в систему управления промышленного робота, а также регистрируется персональным компьютером 1.

Для определения условий заклинивания нежесткий вал устанавливался во втулку, при этом он перемещался вниз до глубины сопряжения q = 20 мм. Вал изготавливался из пластика (литейный фторопласт-Ф4, модуль упругости E= 500 МПа) и имел внешний диаметр d= 15,8 мм, диаметр отверстия d_O=9,8 мм. Втулка изготавливались из стали Ст45. Сопряжение выполнялось с минимальным зазором 0,1 мм. Фаски на сопрягаемых деталях составляли C_B = 0,6 мм. Для решения поставленной задачи был выбран схват, обеспечивающий возможность организации обратной связи в системе управления промышленным роботом. Длина от торца вала до края, зажатого схватом, составляла L=78 мм. Испытание проводилось на двух пластиковых валах с отверстием и без отверстия при одинаковых зазорах в соединении. У пластикового вала с отверстием толщина стенки составляла t=3 мм.

На рис. 6 показано изменение сил и моментов, возникающих в точках контакта в процессе сопряжения.

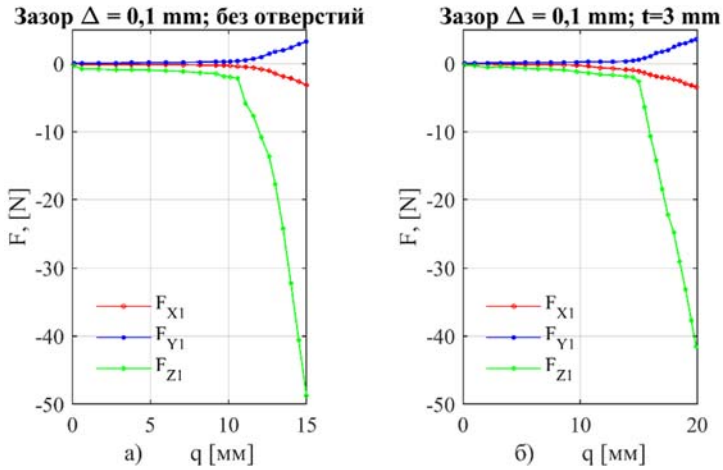


Рис. 6. Зависимость компонент главного вектора сил и моментов от глубины сопряжения: а – для валов без отверстий; б – для валов с отверстиями

По горизонтальной оси откладывались величины глубины сопряжения q. По вертикальной оси откладывались составляющие главного вектора силы. Видно, что значения силы и крутящего момента медленно увеличиваются в начальный момент сопряжения, а затем растёт с увеличением глубины сопряжения. Видно, что значения осевой сборочной силы в двух случаях заметно различаются. В случае более жесткого вала без отверстия значение осевой силы, необходимой для сборки, больше. Это различие возрастает с увеличением глубины сопряжения. При разных глубинах сопряжения вала со втулкой (рис. 6, а) видно, что имеет место резкий рост составляющей главного вектора сил F_{Z1} после 11,1 мм, а рис. 6,б после 15,5 мм. Это свидетельствует о возникновении заклинивания в зоне сборки.

В табл. 1 и 2 приведены значения составляющих сил и моментов F_{X1}, F_{Y1}, F_{Z1}, M_{X1}, M_{Y1}, M_{Z1}, полученные с силомоментного датчика и рассчитанные с помощью MATLAB по уравнениям (21) - (23).

На рис. 7 показаны диаграммы заклинивания при различной глубине сопряжения пластикового вала без отверстия. На глубине до 10,6 мм заклинивания не происходит. Точка, соответствующая строке 9 табл. 1, находится внутри области диаграммы (рис. 7, а). Однако при глубине сопряжения q=11,1 мм возникает заклинивание. Точка с координатами, соответствующими строке 10 табл. 1, находится уже вне области диаграммы (рис. 7, б).

Таблица 1

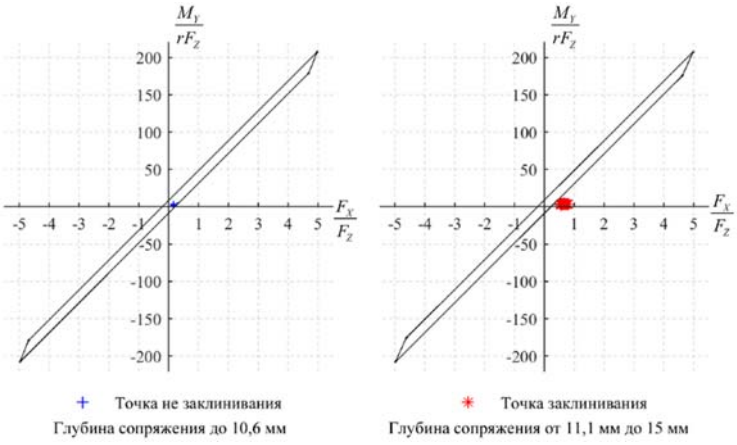
Экспериментальные результаты при сборке нежесткого вала без отверстия с зазором 0,1 мм

№	F_{XI} [Н]	F_{YI} [Н]	F_{ZI} [Н]	M_{XI} [Нм]	M_{YI} [Нм]	M_{ZI} [Нм]	q [мм]	F_X/F_Z	$f(\gamma)$	b'	b
1	-0,1045	0,1444	-0,8940	0,00059	-0,01407	0,00282	3,8	0,1993	4,9886	0,9303	0,9832
2	-0,1149	0,1773	-0,9200	0,00069	-0,01728	0,00315	4,9	0,2297	4,9861	1,1830	1,3129
3	-0,1331	0,1880	-1,0366	0,00096	-0,01952	0,00356	6,0	0,2222	4,9842	1,5617	1,6338
4	-0,1574	0,2122	-1,1425	0,00122	-0,02176	0,00402	7,1	0,2312	4,9830	1,8243	1,9556
5	-0,1970	0,2446	-1,3165	0,00181	-0,03727	0,00555	8,2	0,2386	4,9661	2,1049	2,2702
6	-0,2181	0,2664	-1,4522	0,00195	-0,04506	0,00626	9,2	0,2371	4,9583	2,4128	2,5334
7	-0,2577	0,2934	-1,8513	0,00202	-0,05938	0,00727	9,7	0,2109	4,9438	2,5273	2,6334
8	-0,2878	0,3213	-1,9462	0,00346	-0,06916	0,00813	10,1	0,2216	4,9347	2,6470	2,6963
9	-0,4209	0,3778	-2,1689	0,00494	-0,08637	0,01061	10,6	0,2607	4,9211	2,7718	2,7894
10	-0,4890	0,5424	-5,8458	0,00789	-0,13915	0,01542	11,1	0,1249	4,8699	3,1024	2,8975
11	-0,5731	0,7379	-7,6935	0,00826	-0,20288	0,01719	11,6	0,1214	4,8115	3,1757	2,9826
12	-0,8216	0,9827	-10,825	0,00958	-0,33675	0,02249	12,1	0,1183	4,6912	3,2776	3,0602
13	-1,0210	1,4538	-13,648	0,01019	-0,43069	0,03565	12,6	0,1301	4,6220	3,3232	3,1250
14	-1,4564	1,7967	-17,752	0,01238	-0,65635	0,04804	13,0	0,1302	4,4434	3,3533	3,1069
15	-1,8631	1,9731	-24,257	0,01485	-0,87678	0,07482	13,5	0,1118	4,2823	3,4109	3,1779
16	-2,1484	2,3421	-32,180	0,01643	-1,03826	0,10557	14,0	0,0987	4,1839	3,6427	3,2347
17	-2,6218	2,8992	-40,608	0,01949	-1,31519	0,12607	14,5	0,0962	4,0329	3,8722	3,2516
18	-3,1257	3,2440	-48,781	0,02392	-1,58355	0,15560	15,0	0,0923	3,8919	4,0442	3,2949

Таблица 2

Экспериментальные результаты при сборке нежесткого вала с отверстием с зазором 0,1 мм (толщина стенки t = 3 мм)

№	F_{XI} [Н]	F_{YI} [Н]	F_{ZI} [Н]	M_{XI} [Нм]	M_{YI} [Нм]	M_{ZI} [Нм]	q [мм]	F_X/F_Z	$f(\gamma)$	b'	b
1	-0,1029	0,1310	-0,5603	0,00054	-0,01572	0,00157	4,3	0,2973	4,9857	1,0744	1,1546
2	-0,1142	0,1681	-0,6875	0,00061	-0,01609	0,00161	5,3	0,2956	4,9872	1,2699	1,4552
3	-0,1278	0,1751	-0,7541	0,00087	-0,01850	0,00183	6,4	0,2875	4,9845	1,5769	1,7852
4	-0,1413	0,1965	-0,8243	0,00103	-0,01958	0,01273	7,5	0,2936	4,9842	1,9101	2,1150
5	-0,1523	0,2190	-0,9180	0,00137	-0,02149	0,01384	8,6	0,2906	4,9828	2,1995	2,4438
6	-0,2190	0,2420	-1,1618	0,00140	-0,02335	0,01485	9,7	0,2810	4,9831	2,4028	2,7729
7	-0,3790	0,2746	-1,3475	0,00156	-0,02534	0,01595	10,7	0,3474	4,9868	2,8692	3,0719
8	-0,5863	0,2905	-1,5754	0,00178	-0,02755	0,01697	11,7	0,4153	4,9919	3,0792	3,3714
9	-0,6978	0,3107	-1,6874	0,00193	-0,02954	0,01821	12,8	0,4526	4,9935	3,3814	3,6998
10	-0,8690	0,3706	-1,8430	0,01298	-0,03040	0,01931	13,9	0,5126	4,9961	3,7497	4,0281
11	-0,9416	0,4462	-1,9940	0,01443	-0,03341	0,02067	14,5	0,5225	4,9951	4,0962	4,2055
12	-1,0769	0,5952	-2,5904	0,01542	-0,05370	0,02295	15,1	0,4750	4,9776	4,2553	4,3473
13	-1,3335	0,8778	-6,3699	0,01608	-0,20614	0,02976	15,5	0,2506	4,8139	4,5414	4,4489
14	-1,6158	1,0692	-10,655	0,01723	-0,34716	0,03457	16	0,1818	4,6753	4,6220	4,5572
15	-1,8861	1,5348	-14,255	0,01868	-0,46420	0,03818	16,5	0,1705	4,5767	4,7545	4,6729
16	-2,0592	1,7919	-18,481	0,01987	-0,60282	0,04545	17	0,1477	4,4609	4,8116	4,7808
17	-2,1023	2,0061	-22,257	0,02173	-0,72522	0,06045	17,5	0,1305	4,3647	4,9116	4,8922
18	-2,3301	2,4694	-24,839	0,02374	-0,80845	0,07667	18	0,1366	4,3163	5,2533	5,0180
19	-2,5100	2,8386	-29,041	0,02483	-0,94340	0,08319	18,5	0,1304	4,2281	5,4101	5,1279
20	-2,9774	3,0146	-33,140	0,02590	-1,07620	0,12298	19	0,1278	4,1493	5,7986	5,2389
21	-3,1658	3,3801	-37,707	0,02697	-1,22538	0,15903	19,5	0,1228	4,0629	6,1774	5,3459
22	-3,3959	3,6144	-41,593	0,02851	-1,35589	0,19838	19,9	0,1192	3,9962	6,5075	5,4298

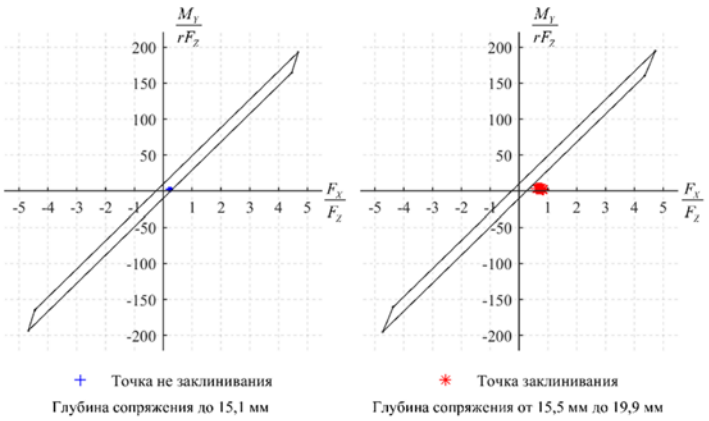


а *б*

Рис. 7. Диаграмма заклинивания при различной глубине сопряжения вала без отверстия: а – точка не заклинивания находится внутри области диаграммы; б – точка заклинивания находится вне области диаграммы

Аналогичный эффект наблюдается при сопряжении полого пластикового вала с жесткой втулкой. На рис. 8 показаны диаграммы заклинивания при различной глубине сопряжения пластикового вала с отверстием. На

глубине до 15,1 мм заклинивания не происходит: точка, соответствующая строке 12 таблицы 2, находится внутри области диаграммы (рис. 8, а). Однако при глубине сопряжения q=15,5 мм происходит заклинивание. Точка с координатами, соответствующими строке 13 табл. 2, находится уже вне области диаграммы (рис. 8, б).



а *б*

Рис. 8. Диаграммы заклинивания при различной глубине соединения вала с отверстиями: а – точка не заклинивания находится внутри области диаграммы; б – точка заклинивания находится вне области диаграммы

Разработана математическая модель сборки нежесткого вала с жесткой втулкой, позволяющая определить условия возникновения заклинивания при двухточечном контакте. Полученные условия заклинивания нежесткого вала в предельном случае совпадают с условиями Simunovic S. [2] для абсолютно жесткого вала. Адекватность предложенной математической модели подтверждена проведенным экспериментом, результаты которого показывают, что заклинивание существенно зависит от величины изгибной жесткости вала, а именно заклинивание вала с большей жесткостью происходит на меньшей глубине сопряжения. Результаты исследования являются основой для разработки алгоритма позиционно-силового управления роботом при сборке нежестких цилиндрических деталей.

Список литературы

1. Гусев А.А., Павлов В.В., Андреев А.Г. и др. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов и др. Технология сборки в машиностроении. Т. III – 5 под общей редакцией Ю.М. Соломенцева. М., Машиностроение, 2001. 640 с.

2. Simunovic S. Force Information in Assembly Processes // Presented at the 5th International Symposium on Industrial Robots. 1975. P. 414 – 431.

3. Whitney D.E. Mechanical assemblies-Their Design. Manufacture and Role in Product Development. Oxford University Press, 2004. 273 p.

4. Whitney D.E. Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts // ASME J. Dynamic Systems Measurement and Control. 1982. V.104(1). P. 65 – 77.

5. Ноф Ш. Справочник по промышленной робототехнике. Книга 2. - М., Наука, 1990. 479 с.

6. Вартанов М.В., Петров В.К., Нгуен Ван Зунг, Чан Динь Ван. Анализ условий заклинивания при роботизированной сборке с использованием силомоментного датчика // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2021, №3(58). С.43 – 48.

7. Zhang K. Jamming Analysis and Force Control for Flexible Dual Peg-in-hole Assembly / K. Zhang, J. Xu, H. Chen, J. Zhao, K. Chen // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. V. 66(3). P. 1930 –1939.

8. Fei Y. Contact and jamming analysis for three dimensional dual peg-in-hole mechanism / Y. Fei, X. Zhao // Mechanism and Machine Theory. 2004. V. 39(5). P. 477 – 499.

9. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. Том 1. Статика и Кинематика / под ред. Г.Ю. Джанелидзе, Д.Р. Меркина. М.: Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1967. 512 с.

10. Коган Е.А., Вартанов М.В., Нгуен Ван Линь. Математические модели деформирования нежестких деталей при роботизированной сборке // «СТИН». 2022, №12(2). С.40 – 44.

11. Вартанов М.В., Нгуен Ван Зунг, Нгуен Ван Линь. Математическая модель процесса сопряжения соединения «вал-втулка» с помощью активного средства адаптации при трехточечном контакте // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2022. Том 9, № 3. С.28 – 32.

12. Анализ степени деформации нежестких цилиндрических деталей при роботизированной сборке с использованием силомоментного датчика / М.В. Вартанов, Е.А. Коган, Нгуен Ван Линь // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 3. С. 3 – 9.

Вартанов Михаил Владимирович, д-р техн. наук, профессор, natalia.vartanova@bk.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Коган Ефим Александрович, канд. физ.-мат. наук, доцент, kogan_ea@mail.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Нгуен Ван Линь, аспирант, nguyenlinh.hvktqs@gmail.com, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Дао Ван Луу, канд. техн. наук, daoluumta@gmail.com, Вьетнам, Ханой, Государственный технический университет имени Ле Куи Дона.

JAMMING DIAGRAM OF NON-RIGID OF CYLINDRICAL PARTS DURING ROBOTIC ASSEMBLY BASED ON THE USE OF A FORCE-TORQUE SENSOR

M.V. Vartanov, E.A. Kogan, Nguyen Van Linh, Dao Van Luu

To develop the technology of robotic assembly, it is necessary to determine the conditions for jamming parts. A mathematical model of a robotic assembly has been developed, which is necessary to identify the position of the non-rigid shaft by signals from a force-torque sensor. The obtained analytical solutions made it possible to determine the conditions for the occurrence of jamming of the elastic shaft during two-point contact during the coupling of the shaft with a rigid sleeve. The calculated and experimental values of the moment make it possible to correct the program trajectory of the output link of the robot during the coupling process.

Key words: robotic assembly, force-torque sensor, jamming conditions, non-rigid parts, jamming diagram.

Vartanov Mikhail Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, natalia.vartanova@bk.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Kogan Efim Alexandrovich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, kogan_ea@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Nguyen Van Linh, postgraduate, nguyenlinh.hvktqs@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Dao Van Luu, candidate of technical sciences, daoluumta@gmail.com, Viet Nam, Ha Noi, Le Quy Don Technical University

УДК 621.715.2
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-664-665

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ В ИЗГОТОВЛЕНИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Р.А. Жилин, П.В. Струнки́н, С.А. Никитин

Рассматриваются возможность использования новой конструкции фрезы, изготовленной с помощью аддитивных технологий, являющейся альтернативной традиционной цельнометаллической. Рассмотрены несколько вариантов гибридной конструкции, включающей оболочечный хвостовик и массивную рабочую. Анализ проводился с использованием возможностей численного моделирования с применением метода конечных элементов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, высоко технологическая оснастка, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

За последние годы развитие технологий изготовления изделий шагнуло на качественно новый уровень. Применение 3D-печати, или другими словами аддитивных технологий, во всех областях техники и строительства дало технологам современный и мощный инструмент. Конструкторы в свою очередь часто не учитывают многие открывшиеся перспективы. К таким возможностям можно отнести создание таких конструктивных форм, которые невозможно получить никакими традиционными методами. При этом механические характеристики изделий полученных при помощи 3D-печати не уступают, а иногда и превосходят аналогичные свойства изделий, изготовленных привычным способом [1–3].

Цель данной работы – обратить внимание конструкторов на новые возможности проектирования вращающихся инструментов с применением аддитивных технологий.

В качестве объекта исследования выбрана фреза длинной 135 мм и наружным диаметром 65 мм. Согласно техническим условиям эксплуатации при работе фреза должна быть неподвижно зажата в цанговом пяти лепестковом патроне. Усилие затяжки, создаваемое патроном достигает 54000 Н, при этом каждый лепесток создаёт усилие 10,8 кН [4–8]. По условию постановки задачи исследование напряжённо-деформированного состояния новой конструкции было решено провести в условии предварительной затяжки в цанговом патроне.

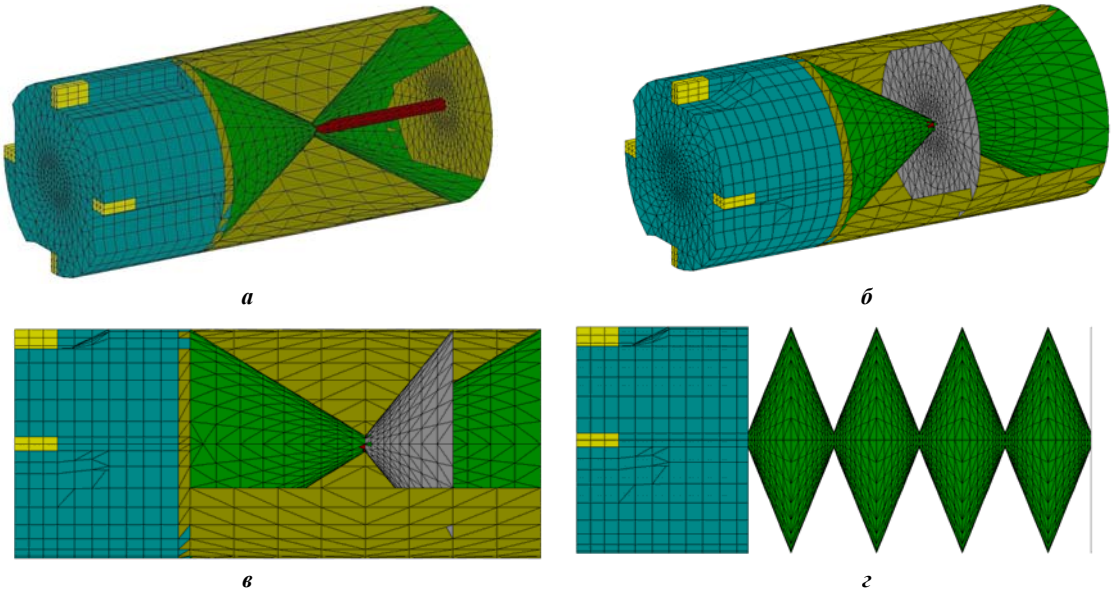
Традиционная форма фрезы представляет собой металлическую державку с проточками в головной части для установки сменных резцовых пластин и выброса стружки. Внутри тела фрезы высверливают каналы для подачи охлаждающей жидкости в рабочую зону.

Альтернативная конструкция предполагает вместо сплошного цилиндрического хвостовика использовать оболочечную конструкцию, усиленную ребрами жёсткости. В центральной части хвостовика смоделирован подвод охлаждающей жидкости. Головная часть фрезы новой конструкции была оставлена практически неизменной цельнометаллической.

Было спроектировано четыре конструктивных модели оболочечной конструкции хвостовика, отличающиеся различным расположением и конфигурацией ребер жесткости.

Создание конечноэлементных моделей концевой фрезы опиралось на рабочие чертежи цилиндрической фрезы. В модель были внесены конструктивные упрощения, оказывающие незначительное влияние на оценку прочности и жесткости детали [10]. Для всех созданных численных моделей общим являются объемные конечные

элементы в головной части и оболочечные в хвостовике. Моделирование было проведено в среде программного комплекса «Моделирование и Анализ Контактных Систем» [9–13]. Полученные конечноэлементные модели представлены на рис. 1. Различный цвет конечных элементов иллюстрирует различную толщину оболочек. Первая модель выполнена с двумя оболочечными коническими рёбрами жёсткости (рис. 1 *а*), вторая – помимо указанных двух ребер ещё усилена центральным плоским ребром (рис. 1 *б*), третья – вместо с центрального плоского ребра установлено коническое ребро (рис. 1 *в*), четвёртая – с четырьмя оболочечными коническими дисками (рис. 1 *г*).



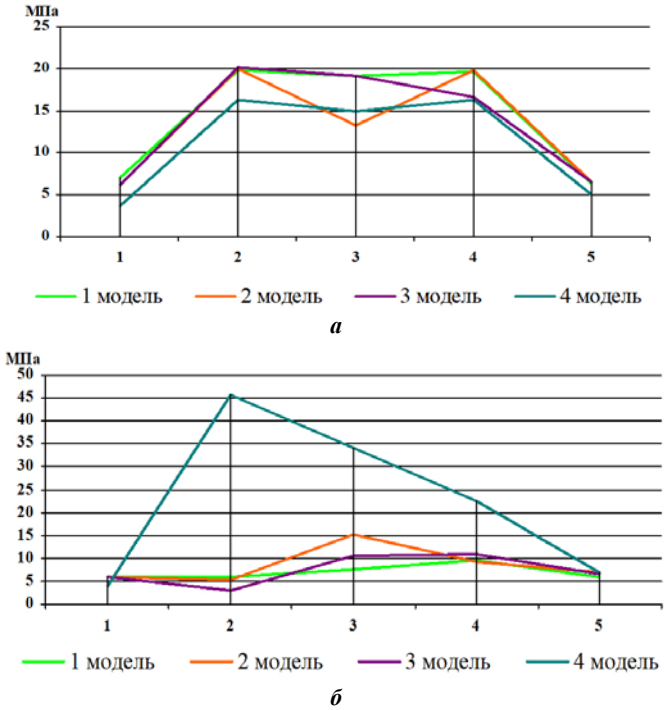
а ***б*** ***в*** ***г***

Рис. 1. Конечноэлементные модели с местным разрезом в хвостовике

Численное моделирование в среде программного комплекса МАКС позволило получить пространственные эпюры полей напряжений и деформированного состояния для каждой из четырёх моделей.

Для удобства анализа результатов численного моделирования на рис. 2 представлены графики сравнения эквивалентных напряжений по десяти наиболее характерным узлам моделей. Выбрано пять узлов на наружной оболочке и пять на центральном канале для подвода охлаждающей жидкости.

В первой модели наибольший уровень деформированного состояния равный 0,00368 мм наблюдается на наружной цилиндрической поверхности в области приближенной к торцу хвастовика (рис. 3 а).



а

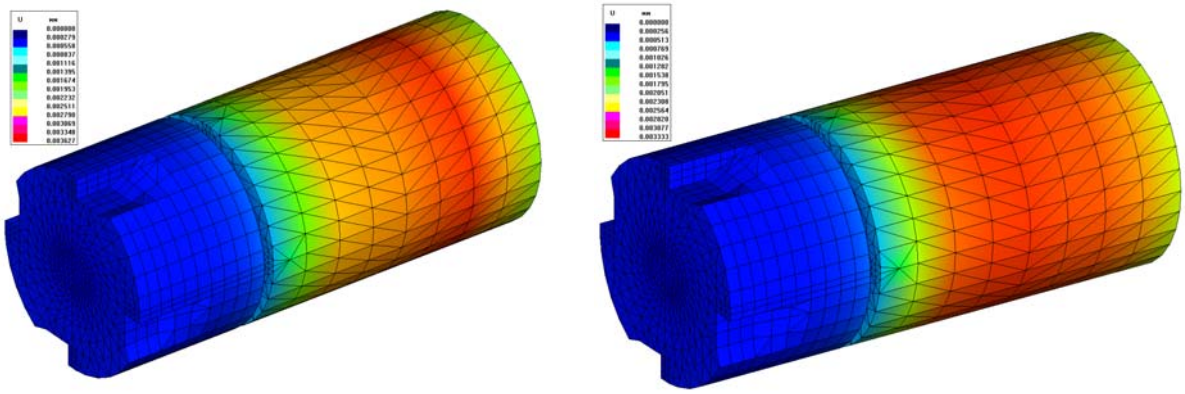
б

Рис. 2. Эквивалентные напряжения на наружной поверхности (а) и внутри хвостовика (б)

Вторая модель за счёт плоского ребра жесткоски показала самые средние характерискики по сравнению со всеми остальными моделями.

Третья модель усиленная дополнительным конусом, основание которого примыкает к области концентрации максимальной деформации, выявленной при исследовании первой модели первой модели, по результатам численного моделирования показала снижение уровня деформации до 0,00333 мм, распределение эпюры перемещений стало более симметричным и равномерным (рис. 3 б).

Четвёртая модель показала самые низкие характеристики напряженно-деформированного состояния.



а *б*

Рис. 3. Эпюры перемещений в первом (а) и в третьем (б) вариантах конструкции

Выводы:

1. При изготовлении хвостовика с оболочечными ребрами жесткости в сравнении с традиционной фрезой материалоёмкость снизилась в два раза.

2. Напряженно-деформированное состояние всех представленных моделей не превышает допустимых значений при затяжке.

3. Наиболее удачным с точки зрения распределения нагрузки, изготовленном гибридным технологическим процессом с применением аддитивных технологий, является третий вариант фрезы. В данном варианте модели возникают самые низкие эквивалентные напряжения (до 20,16 МПа) и наименьшие показатели линейной деформации (до 0,003333 мм).

Список литературы

1. Довбыш В.М., Забеднов П.В., Зленко М.А. Аддитивные технологии и изделия из металла [Электронный ресурс] http://nami.ru/uploads/docs/centr_technology_docs/55a62fc89524bAT_metall.pdf (дата обращения: 01.09.2023).

2. 3D-печать металлами — технологии и принтеры. 3D-принтеры, Блог компании «Top 3D Shop» [Электронный ресурс] https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/400731 (дата обращения: 01.09.2023).

3. Степанова Е.Ю., Бурнашов М.А., Степанов Ю.С. Аддитивные и гибридные технологии в производстве инструмента и технологической оснастки: состояние, экономика, перспективы. Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 8. Ч. 1 С. 141-146.

4. ГОСТ 29092–91 Фрезы цилиндрические. Технические условия. М., 1991.

5. ГОСТ 24644-81 Концы шпинделей и хвостовики инструментов сверлильных, расточных и фрезерных станков. Размеры. Технические требования. М., 1981.

6. ГОСТ 17166–71 Инструмент вспомогательный к металлорежущим станкам. Общие технические требования. М., 1971.

7. ГОСТ 2876-80. Цанги зажимные. Основные и присоединительные размеры. М., 1980.

8. ГОСТ 26539–85 Патроны цанговые с конусом 7:24 для крепления инструмента с цилиндрическим хвостовиком. Основные размеры. М., 1985.

9. Гольник Э.Р., Радченко И.Г., Лейкин М.А. и др. Программный комплекс МАКС и опыт его применения в САПР тяжелых механических прессов // Кузнечно-штамповочное производство. 1995, № 3. С. 19 – 22.

10. Рейтман М.И., Шапиро Г.С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел. М.: Наука, 1976. 258 с.

11. Гольник Э.Р., Жилин Р.А., Радченко И.Г., Рукин Ю.Б. Новые возможности системного математического моделирования при проектировании кривошипных горячештамповочных прессов // Кузнечно-штамповочное производство, 1998. № 3. С. 24–28.

12. Рукин Ю.Б., Жилин Р.А., Измайлов В.Ю. Дискретное моделирование машин и конструкции // НАУКА-ПРОИЗВОДСТВУ, 2006. № 5. С. 119–121.

13. Гольник Э.Р., Дибнер Ю.А., Жилин Р.А. Анализ состояний контактных стыков составных станин тяжелых КГШП в зависимости от уровня их затянутости // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением, 2001. № 3. С. 22–28.

14. Krasnova M.N., Zhilin R.A., Strunkin P.V. Manufacturing of products with application technologies // International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration», Part 2, March 26, 2019. Beijing, PRC, With. 157–174.

15. Жилин Р.А., Краснова М.Н., Струнки П.В. Аддитивные технологии в инструментальном производстве // Высокие технологии в строительном комплексе, 2019. № 1. С. 110–115.

Жилин Роман Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, zhilinr@yandex.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет,

Струнки Павел Владимирович, сотрудник, strunkin-1992@mail.ru, Россия, Воронеж, Воронежский политехнический техникум,

Никитин Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент, niksal76@mail.ru, Россия, Воронеж, Воронежский государственный технический университет

NEW POSSIBILITIES IN MANUFACTURING THE CUTTING TOOL

R.A. Zhilin, P.V. Strunkin

Are considered possibility of use of a new design of the mill made of additive technologies, being alternative traditional all-metal. Some variants of the hybrid design including a shaft and the massive worker are considered. The analysis was spent with use of possibilities of numerical modelling with application of a method of final elements.

Key words: additive technologies, highly industrial equipment, a method of the final elements, the is intense-deformed condition.

Zhilin Roman Anatolevich, candidate of technical sciences, docent, zhilinr@yandex.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University,

Strunkin Pavel Vladimirovich, employee, strunkin-1992@mail.ru, Russia, Voronezh, Voronezh polytechnical technical school,

Nikitin Sergey Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, niksal76@mail.ru, Russia, Voronezh, Voronezh State Technical University

УДК 621
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-667-668

ОБЗОР МЕТОДОВ КРЕПЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН

И.К. Устинов, Ю.В. Иванов, Е.И. Устинов, А.А. Вяткин, Ю.С Калгина

Проведена общая оценка методов крепления твердосплавных пластин. Проанализирована зависимость производительности труда от метода и качества крепления режущих пластин к державкам. Сформулирована прямая зависимость от материала и размеров державки. Представлены рекомендации по выбору марки материала для державки

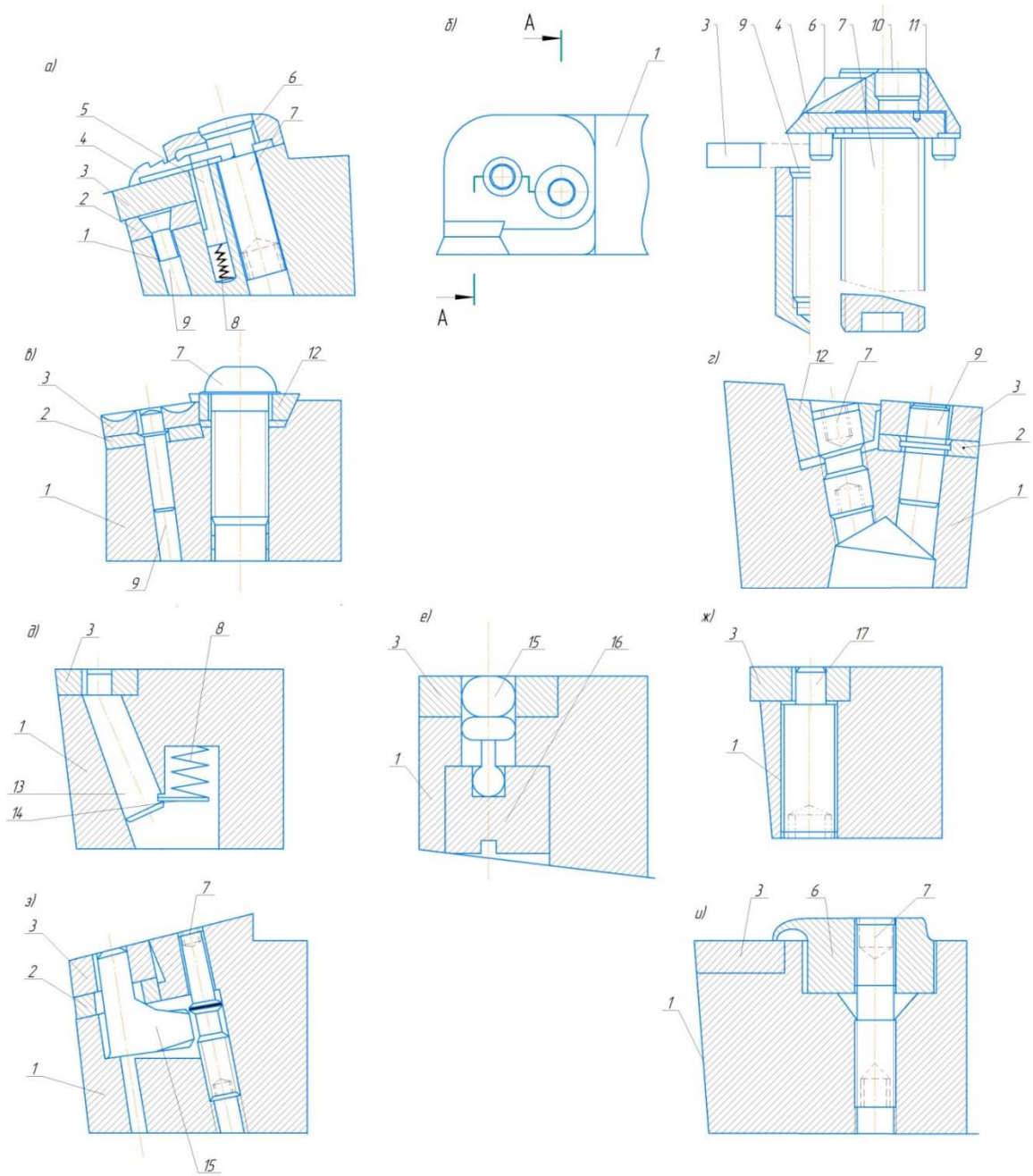
Ключевые слова: твердосплавные пластины, державка, материал, производительность труда.

В настоящее время известно большое количество технической литературы [1-7] и проведены практические занятия [8-10], которые направлены, в первую очередь, на оптимальный подбор крепления режущих твердосплавных пластин с целью увеличения производительности и стойкости режущего инструмента, которые в данном случае зависят от метода и качества крепления режущих твердосплавных пластин к державкам, где выбор материала, так же имеет большое значение.

Выбор материала и размеров державки следует проводить таким образом, чтобы обеспечить высокую жесткость и прочность против сил деформации, которые возникают в процессе резания. Возникающая деформация под воздействием сил резания воздействует на прочность и жесткость державки - все это приводит к неточности изготовления изделия.

Применение инструмента методом напайки твердосплавных пластин приводит к существенному недостатку, а именно: напряжения, возникающие в пластинах из твердого сплава приводят к частому появлению различного вида и типа трещин на поверхности пластин, т.к коэффициенты линейного расширения материалов державок, режущих пластин и припоя различны.

Исследование и практика показали, что механическое крепление твердосплавных пластин обходится дешевле в процессе эксплуатации за счет увеличения стойкости пластины. Различные конструкции приведены на рисунке.



Державки для механического крепления режущих пластин: а, б – крепление прихватом; в, г – крепление клином; д - крепление косой тягой; е – крепление качающимся штифтом; ж – крепление эксцентриком; з – крепление рычажным механизмом; и - крепление малогабаритным прихватом: 1 – державка; 2 – подкладка; 3 – многогранная пластина; 4 – стружколоматель; 5 – штифт; 6 – прихват; 7 – крепежный винт; 8 – пружина; 9 – крепежный штифт; 10 – регулировочный винт; 11 – втулка; 12 – клин; 13 – косая тяга; 14 – планка; 15 – качающийся штифт; 16 – эксцентриковая втулка; 17 – эксцентрик

Выше указанные методы и схема крепления твердосплавных пластин в державках в настоящее время зарекомендовали себя по основным параметрам обработки: точность, надежность ведения технологического процесса механической обработки изделий, а так же увеличение стойкости инструмента.

Список литературы

1. Багдасарова, Т.А. Основы резания металлов: учебное пособие. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 80 с.

2. Кожевников Д. В. Режущий инструмент. [Электронный ресурс] / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов, С.Н. Григорьев. Электрон.дан. М.: Машиностроение, 2014. 520 с.

3. Металлорежущие станки. В 2 т. Т.1: учебник для вузов / Т.М. Авраамова [и др.]; под ред. В.В. Бушуева. М.: Машиностроение, 2011. 608 с.

4.Металлорежущие станки. В 2 т. Т.2: учебник для вузов / Т.М. Авраамова [и др.]; под ред. В.В. Бушуева. М.: Машиностроение, 2011. 608 с.

5. Рахимянов Х.М. Технология машиностроения [Электронный ресурс]: учебное пособие / Х.М. Рахимянов, Б.А. Красильников, Э.З. Мартынов – Электрон. текстовые данные. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014. 254 с.

6.Схиртладзе А.Г. Автоматизация технологических процессов и производств [Электронный ресурс]: учебник / А.Г. Схиртладзе, А.В.Федотов, В.Г. Хомченко. Саратов: Вузовское образование, 2015. 459 с.

7. Устинов И.К., Волков А.В., Коржавый А.П. Технологическая система резания: практика воззрений // Наукоемкие технологии, 2020. Т21. №6. С 49-52.

8. Устинов И.К., Волков А.В., Коржавый А.П. Возможности классификации структурных схем процесса резания // Наукоемкие технологии, 2020. Т21. №6. С. 53-62.

9. Устинов И.К., Волков А.В. Обработка инструментом из сверхтвердых материалов // Лабораторный практикум по дисциплине «Сверхтвердые материалы и особенности эксплуатации». Калуга: Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019.

10. Устинов И.К, Волков А.В. Системы инструментального обеспечения // Методические указания к домашней работе по дисциплине: «Инструменты для станков с ЧПУ» - Калуга: Калужский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019.

Устинов Игорь Кириллович, канд. техн. наук, доцент, ustinov_ik@bmstu.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Иванов Юрий Васильевич, канд. техн. наук, доцент, bdfyjd.d@bmstu.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Устинов Егор Кириллович, студент, ustinovegor.igorevich@gmail.com, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Вяткин Андрей Андреевич, старший преподователь, a-vyatkin@inbox.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Калгина Юлия Сергеевна, студент, kalgina.iulia@yandex.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

REVIEW OF CUTTING CARBIDE PLATES' FASTENING METHODS

I.K. Ustinov, Y.V. Ivanov, E.I. Ustinov, A.A. Vyatkin, Y.S. Kalgina

A general assessment of fastening carbide plates' methods was carried out. The dependence of the labor productivity on the method and the quality of fastening carbide plates to holders are analyzed. A direct dependence on the material and size of the holder are formulated. Recommendations on the choice of the material's brand for the holder are presented.

Key words: carbide plates, holder, material, labor productivity.

Ustinov Igor Kirillovich, candidate of technical science, docent, ustinov_ik@bmstu.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch),

Ivanov Yuri Vasilyevich candidate of technical science, docent, bdfyjd.d@bmstu.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch),

Ustinov Egor Igorevich, student, ustinovegor.igorevich@gmail.com, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch),

Vyatkin Andrey Andreevich, assistant professor, a-vyatkin@inbox.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch),

Kalgina Yulia Sergeevna, student, kalgina.iulia@yandex.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch)

УДК 621.396.67
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-670-671

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НИЗКОПРОФИЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Д.А. Лянгузов

Цель работы: в работе сформулированы требования к синтезируемой широкополосной низкопрофильной антенне, описаны конструкционные параметры излучателей и диапазон их изменения, определена целевая функция.
Ключевые слова: структурно-параметрический синтез, низкопрофильная, широкополосная антенна.

В работах [1, 2] показано, что за счёт изменения формы и размеров верхней ёмкостной нагрузки можно осуществлять регулирование ширины рабочей полосы частот антенны. Однако улучшение широкополосных свойств за счет увеличения геометрических размеров и изменения формы излучателя может привести как к снижению коэффициента усиления на определенных частотах, так и к непредсказуемому изменению входного сопротивления антенны [3]. Данное обстоятельство приводит к необходимости постановки и решения многокритериальной задачи конструкционного синтеза низкопрофильных антенн.

Сформулируем требования к синтезируемой антенне:

1.Антенна должна быть низкопрофильной. Высота конструкции не должна превышать величину 0,02 λ.

2.Для обеспечения помехоустойчивости радиолинии, электромагнитной совместимости и широкополосного доступа антенна должна быть широкополосной, как было отмечено в работе [4].

3.Диаграмма направленности антенны не должна искажаться при установке на поверхность ограниченных размеров.

Наилучшим образом численно оценить степень искажения ДН и, как следствие, снижение КУ в определенном направлении можно используя эквивалентный КУ с учетом искажении ДН в диапазоне частот [5].

Итак, задача КС заключается в определении *i*-го излучателя, который будет удовлетворять максимизации целевой функции (ЦФ) при условии соблюдения требуемых ограничений в установленном диапазоне частот, что будет рассмотрено в дальнейшем.

Рассмотрим основные этапы методики синтеза.

1. Ввод исходных данных:

- диапазон рабочих частот;
- волновое сопротивление фидера;
- входное сопротивление антенны;
- тип излучателя (выбирается в зависимости от расположения абонентской радиостанции: на БПЛА или в подвижном объекте (ПО) (например, для связи в колонне машин);
- габариты антенны;
- ввод КПИ.

2. Построение расчетной области.

3. Выбор численного метода.

4. Постановка задач оптимизации

- выбор метода оптимизации;
- цель оптимизации;
- задачи оптимизации;
- критерии оптимизации (критерий для оценки искажения ДН в диапазоне частот является новым);
- формирование целевой функции;
- настройка способа оптимизации.

5. Решение оптимизационной задачи

- вычисление ЭХ синтезируемого излучателя, представленных в качестве критериев ЦФ, вычисление значения ЦФ;
- последовательное выполнение процессов: оценивания, выбора, формирования новых конструкций, замещения, удаления (процесс проходит по замкнутому циклу, до момента удовлетворения критерию остановки, после чего выполняется процесс завершения);
- выбор подходящего варианта излучателя из числа наиболее соответствующих ЦФ.

Рассмотрим некоторые из этапов.

Ввод исходных данных. В качестве примера рассмотрим диапазон рабочих частот 50-500 МГц. Волновое сопротивление фидера и входное сопротивление антенны примем 50 Ом.

В зависимости от назначения антенны и варианта размещения на корпусе ПО подбирается тип излучателя. Для работы через ретранслятор, установленный на БПЛА [1] целесообразно применять микрополосковую антенну, а для работы земной волной – вибраторную антенну [2]. Габариты соответствующих прототипов примем как максимальные для данных площадок размещения и реализацией широкополосности, с дальнейшим усечением до минимально возможных значений последних при требуемом достижении значения целевой функции. Значения КПИ, обозначающих габариты обоих излучателей, представлены в таблице 1.

Ввод КПИ. Предварительный электродинамический анализ МКЭ показал, что имеется возможность улучшения электрических характеристик данных излучателей за счёт изменения геометрической формы. Наиболее эффективными КПИ являются: (для 1 прототипа): d – расстояние между емкостными вставками (ЕВ), b – ширина ЕВ, a – толщина ЕВ, h – высота антенны, W – ширина антенны, L – длина антенны; (для 2 прототипа) $D1$-$D4$ – внешние диаметры верхней ёмкостной нагрузки, $d1$-$d4$ – внутренний диаметр верхней ёмкостной нагрузки, r – радиус возбуждающего НСВ, $h1$-$h4$ – высоты установки емкостной нагрузки (относительно кузова ПО), W – ширина шунтов.

Диапазон изменения переменных

Наименование	Начальное значение, м	Минимальное значение, м	Максимальное значение, м
Малозаметная низкопрофильная антенна с изменяемой ДН			
a	0.01	0.005	0.01
b	0.5	0.3	0.9
c	0.16	0.11	0.18
d	0.06	0.01	0.1
h	0.2	0.1	0.2
W	1.4	1	2.4
L	0.9	0.4	1.8
Низкопрофильная несимметричная бортовая антенна для работы поверхностными волнами			
*D*1	0.6	0.516	1.4
*D*2	0.2	0.191	0.516
*D*3	0.08	0.07	0.191
*D*4	0.06	0.05	0.07
*d*1	0.5	0.14	1.4
*d*2	0.04	0.052	0.516
*d*3	0.03	0.019	0.191
*d*4	0.02	0.007	0.07
r	0.07	0.05	0.14
W	0.02	0.01	0.04
*h*1	0.2	0.1	0.2
*h*2	0.07	0.06	0.1
*h*3	0.03	0.02	0.06
*h*4	0.015	0.01	0.02

Главным ограничением являются вычислительные возможности ЭВМ, поскольку увеличение переменных ведёт к степенному увеличению количества возможных вариантов, требующих обработки. Помимо числа КПИ, подлежащих анализу, ограничением для каждого прототипа будут значения D, h и D_1, h_1 соответственно, обозначающие «полезный объем», занимаемый антенной, определяемый размерами поверхности ограниченных размеров, на которую установлена антенна. Учитывая размеры кузова ПО и требования по низкопрофильности конструкции, примем следующие ограничения:

а) D_1, $D < 2.1$ м;

б) h_1, $h < 0.2$ м;

в) $D_4 < D_3 < D_2 < D_1$;

г) $d_4 < d_3 < d_2 < d_1$;

д) $h_4 < h_3 < h_2 < h_1$;

е) $W_1 = W_2 = W_3 = W_4 = W$;

ж) $d_4 > r$.

Выбор численного метода.

Учитывая сложную форму антенны, необходимо достаточно точно построить модель излучателя. К тому же стоит учитывать потери в материалах антенны и особенности модели возбуждения. Указанным требованиям в полной мере соответствует векторный МКЭ.

Постановка задачи оптимизации.

Принимая во внимание большую размерность задачи выберем метод оптимизации с помощью генетического алгоритма (ГА). Целью оптимизации является синтез низкопрофильной малозаметной антенны, ХН которой не искажается после установки на поверхность ограниченных размеров. Задачами оптимизации являются:

- поиск значений КПИ, при которых ЦФ минимальна;
- усечение модели ПО до уровня 0,85 от максимальной высота корпуса для повышения точности вычислений;

Критериями оптимизации в соответствии с целью являются:

1. Относительная широкополосность антенны *B(w)*.

$$B(\omega_0) = \max\left(B_{\text{КСВ}}(\omega)\right) \approx \max\left[\frac{4R_{\text{A}}(\omega)\left|\dot{\Gamma}^{\text{доп}}\right|\left|Y_{\text{A}}(\omega)\right|'}{\omega_0}\right],$$

где ω_0– основная частота широкополосной антенны; $\Gamma_{\text{доп}}$ – допустимый коэффициент отражения от входа антенны.

Данный критерий позволяет приближенно найти относительную ширину рабочих частот B широкополосных антенн. Выяснилось, что входная проводимость Y_a и спектр величины B исходного прототипа, рассчитанные векторным МКЭ, указывают на эквивалент параллельного резонанса на частоте ω_0, т. е. на то место частотной оси, где величина G_a имеет практически постоянное значение [4].

Исходя из полученных в дальнейшем величин Y и B, можно найти некое сопротивление $\rho = R_A B(\omega_0)$. Если установить данное сопротивление в качестве параметра возбуждения ($\rho = \rho_ф$), величина перекрытия может значительно увеличиться. Это обусловлено точным «попаданием» на эквивалентное волновое сопротивление антенны.

2. Эквивалентный коэффициент усиления $G_{\text{экв}}$ с учетом несогласованности со входом антенны и неравномерности ДН.

$$G_{экв} = D \cdot \eta \cdot \left|1 - \left|\Gamma_{доп}\right|^2\right| \cdot (1 - K_{нер}(f))$$

Несогласованность со входом антенны учитывается через множитель $\left|1 - \left|\Gamma_{доп}\right|^2\right|$, а неравномерность ДН с помощью множителя $(1 - K_{нер}(f))$, где $\text{K}_{\text{нер}}(f, \varphi') = \dfrac{G_\infty(\theta, \varphi', f)_{min}}{G_\infty(\theta, \varphi', f)_{max}}$.

Как видно из формулы определения коэффициента неравномерности, оценка производится для фиксированного значения УМ. Принимая во внимание тип излучателя, определяется значение угла φ.

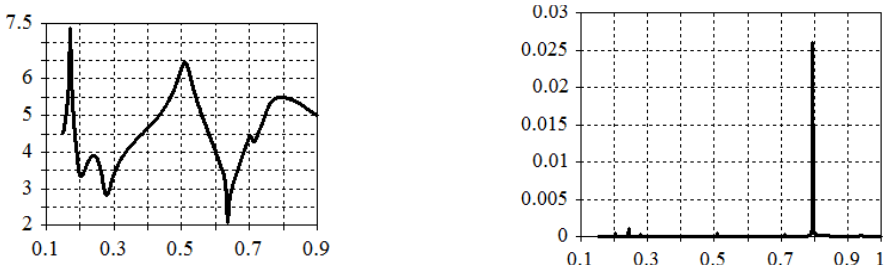
Формирование целевой функции.

Целевая функция (ЦФ) $F(\omega)$ в общем виде выглядит следующим образом:

$$F(w) = \max\left[W_1 \cdot G_{экв}(w) + W_2 \cdot B(w)\right],$$

где *W1, W2* – весовые коэффициенты, определяемые с учетом размерностей $G_{экв}$ и *B*.

Для вычисления весовых коэффициентов оценим диапазон изменения каждого слагаемого ЦФ (рис. 1).



Диапазон изменения $G_{экв}$ (слева) и B (справа)

Принимая во внимание максимальные значения указанных критериев вычислим значения весовых коэффициентов.

Итого ЦФ имеет вид:

$$F(w) = \max\left[W_1 \cdot G_{экв}(w) + W_2 \cdot B(w)\right],$$

Таким образом, задача структурно-параметрического синтеза заключается в поиске такого вектора КПИ, при котором значения ЦФ будет максимальным. Настройке алгоритма оптимизации и поиску квазиоптимального решения будут посвящены дальнейшие исследования.

Список литературы

1. Лянгузов, Д. А. Низкопрофильная антенна с изменяемой диаграммой направленности / Д. А. Лянгузов // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 80-91. DOI 10.24412/2410-9916-2022-2-80-91. EDN QRAWLQ.

2. Бородулин, Р. Ю. Модель низкопрофильной антенны для размещения на поверхности ограниченных размеров / Р. Ю. Бородулин, Д. А. Лянгузов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 12. С. 193-199. DOI 10.24412/2071-6168-2022-12-193-200. EDN LEMJWJ.

3. Бородулин Р.Ю. Конструкционный синтез электрически малых антенн: Монография. СПб.: ВАС, 2020. 180 с.

4. Бородулин Р.Ю. Методика энергетической оценки широкополосных антенн / Р. Ю. Бородулин, О. Ю. Перфилов // Антенны. 2017. № 4(236). С. 14-24. EDN YLMILN.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615321 Российская Федерация. Вычисление коэффициента неравномерности характеристики направленности антенны с использованием метода Стреттона-Чу: № 2023611856: заявл. 03.02.2023: опубл. 14.03.2023 / Д. А. Лянгузов, А. С. Леонюк, Р. Ю. Бородулин.

Лянгузов Данила Андреевич, адъюнкт, danilalgz@ya.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связ.

STATEMENT OF THE PROBLEM OF STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF A LOW-PROFILE ANTENNA

D.A. Lyanguzov

The requirements for the synthesized antenna are formulated, the design parameters of the emitters and the range of their charge are described, and the objective function is determined.

Key words: structural-parametric synthesis, low-profile, broadband antenna.

Lyanguzov Danila Andreevich, postgraduate, danilalgz@ya.ru. Russia, St. Petersburg, Military Communications Academy

УДК 621.914.025.7
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-673-674

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЧЕРВЯЧНЫХ ЗУБОФРЕЗЕРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ЗА СЧЕТ ГРУППОВОЙ СХЕМЫ РЕЗАНИЯ

Е.В. Артамонов, О.И. Борискин, В.В. Киреев, В.А. Зырянов, Д.В. Васильев

Использование твердосплавных пластин может существенно повысить как эффективность инструмента, так и эксплуатационные характеристики. Разработка новой схемы сборного инструмента с измененными твердосплавными пластинами для изготовления зубчатых колес знаменует собой колоссальный прогресс в области машиностроения. Прогрессивные инструменты обеспечивают быструю окупаемость инвестиций при покупке новых станков, увеличивают производительность старого оборудования и операторов станков. Нынешняя ситуация отражает авангардную инженерную траекторию, которая подчеркивает важность разработки новых конструкций инструментов, оснащенных сменными твердосплавными сегментами. Использование режущих элементов нового поколения, дает возможность разделять на прямые и округлые участки срезаемые слои, что увеличивает срок службы и эффективность твердосплавных режущих элементов за счет уменьшения их износа.

Ключевые слова: зубофрезерование, моделирование процесса резания, твердый сплав.

Первоклассные устройства прокладывают путь к быстрому возмещению затрат на новые станки, увеличивают производительность старого оборудования и повышают коэффициент эффективности операторов станков. Создание цельного инструмента, особенно для использования с большими модулями зубчатых колес, не имеет экономического смысла. По мере роста промышленного сектора организации активно переходили от быстрорежущих стальных инструментов к инструментам на основе карбида вольфрама (рис. 1) [1-12].

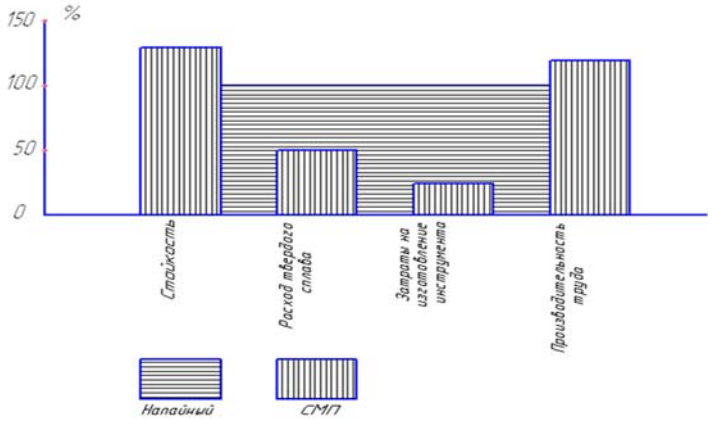


Рис. 1. Преимущества сборного инструмента

Создание фрез для обработки зубчатых колес, оснащенных сменными твердосплавными пластинами, в настоящее время является заметным шагом вперед для машиностроительной промышленности. В отличие от червячных фрез с цельным зубом, инструменты со сменными режущими пластинами обладают целым рядом преимуществ: они позволяют повторно использовать корпус, устраняют необходимость в пайке и затачиванию пластин, улучшают условия обработки и устраняют необходимость в регулировке устройства во время переналадки на сменные режущие пластины. Сложный характер зубофрезерования требует строгих стандартов на инструмент из-за его динамических нагрузок. Несмотря на давнюю традицию производства зубчатых колес, стремление усовершенствовать методологии и разработать передовые металлорежущие инструменты сохраняется, поскольку мечта о создании типичного инструмента по-прежнему недостижима. При разработке нового инструмента первостепенное значение имеет его эффективность, полученная в результате проведенных исследований наилучших методов крепления режущих пластин, работоспособности инструмента и снижения напряжений в процессе обработки (рис. 2).

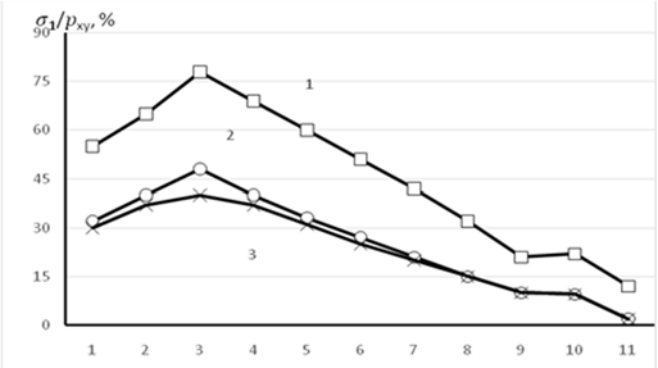


Рис. 2. Зависимость главных напряжений от геометрических размеров пластины. 1 – l=11 мм; S=3,18 мм; 2 – l=16,5 мм; S=4,76 мм; 3 – l=22 мм; S=4,76 мм

На графике подчеркивается зависимость толщины пластины от ее длины. Но крайне важно учитывать экономическую сторону и стоимость инструментального твердого сплава для изготовления сменных режущих пластин. Поэтому произвольное утолщение пластины может оказаться непрактичным. В процессе разработки фрезы для обработки зубчатых колес мы предлагаем тангенциальную конфигурацию режущих пластин внутри корпуса инструмента. Такая конфигурация экономит на прочном сплаве, обеспечивает стабильное позиционирование пластин, улучшает траекторию стружки и обеспечивает быстрый доступ для замены винтов при поломке пластин. Как показано на рисунке 3, существует усовершенствованный метод резания, позволяющий распределять срезаемые слои во время зубофрезерования с помощью тангенциального позиционирования внутри корпуса инструмента.

Рис. 3. Тангенциальное расположения режущих пластин в корпусе инструмента

В результате проектирования режущие элементы имели четыре различных варианта компоновки исходных контуров инструментальной рейки для инструмента (рис. 4).

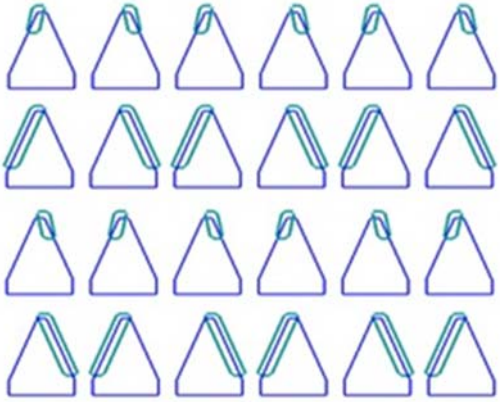


Рис. 4. Профили исходных контуров

Применение такой схемы помогает уменьшить износ червячной фрезы за счет разделения стружки, срезаемой режущими элементами. Это приводит к тому, что стружка приобретает более элементарную структуру, что способствует снижению контактных усилий, действующих на режущий сегмент инструмента. Благодаря этим улучшениям значительно снижается износ и разрушение режущих кромок инструмента. Используя возможности САПР, была разработана схема червячной фрезы для обработки зубчатых колес модуля m=14 (рис. 5).

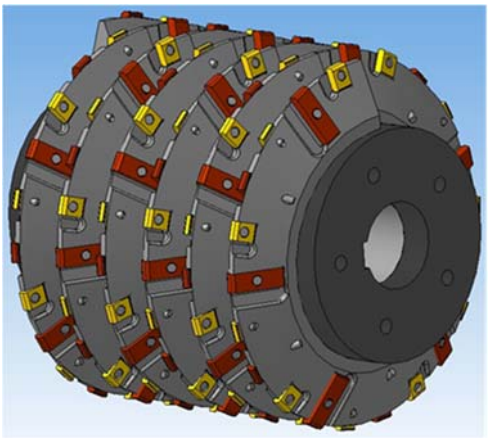


Рис. 5. Сборная червячная фреза

Комбинированный инструмент содержит отдельные диски 1, которые образуют спиральную поверхность 13 с определенным углом подъема ω и содержат тангенциальные полости 2 со стабилизирующими поверхностями для выравнивания режущих узлов, отверстие 3 для установки оправки со шпоночным пазом и пять сквозных отверстий 4 для шпилек. На каждом диске установлены боковые 5 и основные 6 режущие пластины, закрепленные в угловых полостях с помощью винтов 7 (рис.6).

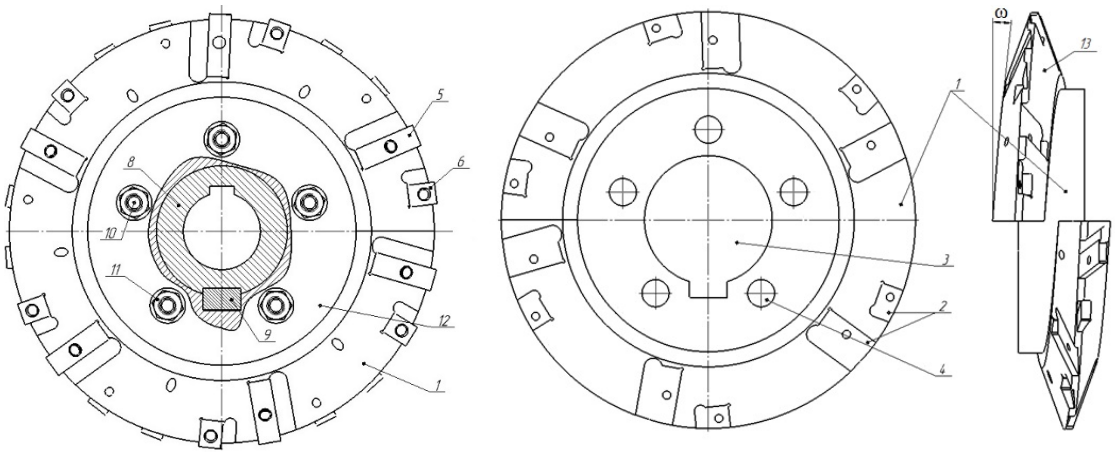


Рис. 6. Сборная червячная фреза

Чтобы исключить возможность поворота режущих дисков на этапе фрезерования, инструмент оснащен втулкой и штифтом в форме призмы, который входит в зацепление со шпоночным пазом. Диски установлены на этой втулке и штифте и закреплены пятью шпильками, каждая из которых снабжена гайкой. На концах корпуса установлены два диска для надежного стягивания дисков модульной червячной фрезы. Модульная червячная фреза работает следующим образом: приспособление устанавливается на шпиндель зубофрезерного станка, и фреза совершает вращательное движение вокруг своей оси и линейное продвижение вдоль оси заготовки. Инструмент, закрепленный на станке, совершает исключительно вращательное движение вокруг своей оси с согласованным вращением червячной фрезы.

Этот червячный зубофрезерный инструмент, созданный с учетом технологических достижений, гарантирует, что все необходимые поверхности для твердосплавных фрез и пазов будут легкодоступны для абразивных кругов. Его конструкция и использование твердосплавных деталей повышают его эксплуатационный срок службы и надежность.

Список литературы

1.Семенченко И.И. Проектирование металлорежущих инструментов / И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров. М.: Машиностроение. 1963. 952 с.

2.Борискин О.И. Эвольвентная червячная фреза с твердосплавными рейками / О. И. Борискин, Н. Г. Стаханов, А. В. Якушенков // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении : всероссийская научно-техническая конференция. Тула, 2019. С. 116-118.

3.Чулин И.В. Повышение стойкости сборных твердосплавных фрез для обработки железнодорожных остряков : 05.02.07 : автореф дис. … канд. техн. наук. Москва, 2011. 24 с.

4.Исаев А.В. Разработка сборных фрез со сменными многогранными твердосплавными пластинами, расположенными на винтовой поверхности, для обработки заготовок с фасонным профилем : 05.02.07 : автореф дис. … канд. техн. наук. Москва, 2012. 24 с.

5.Гречишников В.А. Метод формирования профиля образующей исходной инструментальной поверхности сборных фасонных фрез с режущими пластинами, расположенными вдоль винтовой линии / В. А. Гречишников, А. В. Исаев, В. Б. Романов. //Вестник МГТУ Станкин. 2015. №1. С. 8-12.

6.Чевычелов С.А. Повышение эффективности проектирования гиперболических фрез компьютерным моделированием процесса репрофилирования рельсов : 05.02.07 : автореф дис. … канд. техн. наук. Орел, 2005. 23 с.

7.Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. Тюмень: ТюмГНГУ. 2003. 192 с.

8.Смирнов Н.Н., Зубофрезерование многозаходными червячными фрезами с различными схемами резания : 05.03.01 : автореф дис. … канд. техн. наук. Волгоград, 1982. 20 с.

9.Ничков А.Г. Влияние схемы резания при зубофрезеровании на износ зубьев червячной фрезы / А. Г. Ничков, Б. К. Шунаев // II Научно техническая конференция УПИ : тезисы докладов конференции. Свердловск, 1968. С. 54-60.

10. Ничков А.Г. Основы комплексного исследования процесса зубофрезерования и оптимизации его конструктивных и технологических параметров в простых и комбинированных схемах нарезания зубчатых колес червячными фрезами : 05.03.01 : дис. … докт. техн. наук. Тула, 1991. 566 с.

11. Ничков А.Г. Стойкость червячной фрезы в зависимости от схемы резания. // Передовой научно-производственный опыт резания металлов: тезисы докладов конференции. Свердловск, 1971. С.29-33.

12. Медведицков С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. Москва: Машиностроение. 1981. 106 с.

Артамонов Евгений Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующей кафедрой, artamonovev@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Борискин Олег Игоревич д-р техн. наук, профессор, директор политехнического института, imstulgu@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Киреев Виталий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, kireevvv@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Зырянов Виталий Андреевич, канд. техн. наук, доцент, zyrjanovva@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Васильев Дмитрий Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, vasilevdv@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет

INCREASING THE STRENGTH OF WORM GEAR CUTTING TOOLS DUE TO THE GROUP CUTTING SCHEME

E.V. Artamonov. O.I. Boriskin, V.V. Kireev, V.A. Zyryanov, D.V. Vasiliev

The use of carbide plates can significantly increase both the efficiency of the tool and the operational output. The development of a prefabricated tool scheme with modified carbide plates for the manufacture of gears marks a tremendous progress in the field of mechanical engineering. Excellent tools ensure a quick return on investment when buying new machines, increase the power of old machines and increase the productivity of handlers. The current composition reflects an avant-garde engineering concept that emphasizes the refined caliber of collective instruments equipped with replaceable carbide segments. Using the cutting paradigm of the new generation, the excess is divided into smooth and winding sections, which increases the service life and efficiency of carbide cutting edges by reducing their wear.

Key words: gear milling, modeling of the cutting process, hard alloy.

Artamonov Evgeny Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, artamonovev@tyuiu.ru, Russia. Tyumen. Industrial University of Tyumen,

Boriskin Oleg Igorevich, doctor of technical sciences, professor, director of the polytechnic institute, imstulgu@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Kireev Vitaly Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, kireevvv@tyuiu.ru, Russia. Tyumen. Industrial University of Tyumen,

Zyryanov Vitaly Andreevich, candidate of technical sciences, docent, zyrjanovva@tyuiu.ru, Russia. Tyumen. Industrial University of Tyumen,

Vasiliev Dmitry Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, vasilevdv@tyuiu.ru, Russia. Tyumen. Industrial University of Tyumen

УДК 621:519.23:658.562.3
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-676-677

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК В ХОДЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ

П.М. Винник, Т.В. Винник, Е.А. Еськова

Для решения задач совершенствования существующих технологических процессов под возникающие оперативные задачи и проектирования новых технологических процессов требуется иметь возможность определять доверительные интервалы входных характеристик заготовок для технологической операции по доверительным интервалам выходных характеристик и наоборот. При массовом производстве отслеживание траектории конкретной заготовки крайне затруднительно. Поэтому выборки входных и выходных характеристик следует рассматривать как несогласованные. В статье предлагается метод нахождения функциональной зависимости между входной и выходной характеристикой, на основе которой устанавливается связь между доверительными интервалами.

Ключевые слова: качество, массовое производство, статистический анализ, несогласованные выборки, зависимость формируемых свойств от исходных свойств.

Постановка задачи. Современное массовое производство обладает принципиальными преимуществами: высокая степень специализации производства, механизации и автоматизации технологических операций по формированию параметров изделий. Управление качеством такого производства является одной из основных задач, обеспечивающих технологическую точность и устойчивость процесса.

Оценка качества каждой технологической операции (ТО) основана на оценке надежности изготовления в ходе ТО изделий с заданными выходными характеристиками.

В простейшем случае такая оценка базируется на совместном анализе входной X и выходной Y характеристик изделия с целью установления зависимости доверительных интервалов для выходной характеристики от доверительных интервалов для входной характеристики (см. рисунок 1).

Одним из результатов совместного анализа входной и выходной характеристик может являться нахождение математической функции $\Psi(\cdot)$ технологической операции (преобразования характеристики в ходе ТО).

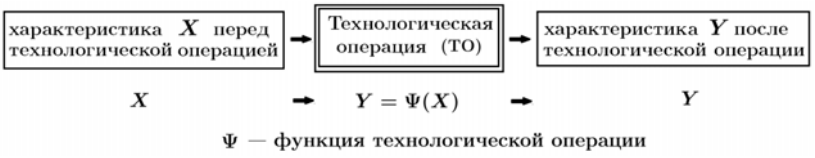


Рис. 1. Формирование характеристик заготовки в ходе технологической операции. Функция технологической операции (преобразования характеристик в технологической операции)

В простейшем случае, когда принимается допущение, что в ходе рассматриваемой ТО существенно изменяется только одна характеристика (а изменением других характеристик можно пренебречь), эта математическая функция является функцией одной переменной $Y = \Psi(X)$ (здесь X – входная характеристика, Y – выходная характеристика).

В более сложных случаях, когда исследуется влияние нескольких входных характеристик $X_1,\ldots,X_n$ на формирование выходной характеристики Y, эта функция будет функцией нескольких переменных $Y = \Psi(X_1,\ldots,X_n)$. В наиболее общем случае следует считать и входную и выходную характеристики векторными. Тогда функция $\Psi(\cdot)$ будет векторной функцией нескольких переменных.

Стандартным, рекомендуемым путем решения задачи поиска функции $\Psi(\cdot)$ является построение линии регрессии [1, с.231, Девятая задача]. Для подтверждения наличия зависимости между входной и выходной характеристиками в ряде случаев [2] рекомендуется сначала установить наличие корреляционной связи между ними. Однако, и для построения линии регрессии, и для вычисления корреляции необходимо наличие **согласованной** двумерной (в простейшем случае) выборки, то есть множество пар

$$\{(X_1,Y_1),\ldots,(X_k,Y_k)\} \tag{1}$$

где первый компонент каждой пары это значение входной характеристики некоторого образца, а второй — значение выходной характеристики этого же образца. Тогда искомая линия регрессии является приближением к графику неизвестной функции $Y = \Psi(X)$.

Однако при массовом производстве получение согласованных выборок вида (1) практически невозможно [3,4]. Поэтому стандартный путь не работает.

Таким образом, задача состоит в поиске функции $\Psi(\cdot)$ технологической операции по **несогласованным** выборкам.

Задача. Даны выборки входных характеристик $X_1,\ldots,X_n$

$$X_{11},\ldots,X_{1k_1},$$
$$\ldots$$
$$X_{n1},\ldots,X_{nk_n},$$

даны выборки выходных характеристик $Y_1,\ldots,Y_m$

$$Y_{11},\ldots,Y_{1j_1},$$
$$\ldots$$
$$Y_{m1},\ldots,Y_{mj_m}.$$

Все эти выборки могут иметь разные объемы и являются несогласованными между собой.

Требуется найти функции $\Psi_1(\cdot),\ldots,\Psi_m(\cdot)$, описывающие зависимости

$$Y_1 = \Psi_1(X_1,\ldots,X_n),$$
$$\ldots$$
$$Y_m = \Psi_m(X_1,\ldots,X_n).$$

Построение математической функции преобразования характеристик в ТО для случая одной входной и одной выходной характеристик. В статьях [3,4] обсуждались возможные направления решения такой задачи для случая $n=1, m=1$. Было предложено подбирать стандартными методами, например, с помощью критериев типа хи-квадрат, функции распределения $F_X(x)$, $F_Y(x)$ по несогласованным выборкам значений отдельно входной и отдельно выходной характеристик.

Считая неизвестную функцию $\Psi(\cdot)$ строго монотонной, по найденным функциям $F_X(x)$, $F_Y(x)$ из равенства

$$F_Y(\Psi(X)) = F_X(X), \tag{2}$$

получаем (здесь $F_Y^{-1}(\cdot)$ – обратная функция к найденной функции распределения $F_Y(x)$ выходной характеристики):

$$\Psi(X) = F_Y^{-1}(F_X(X)), \tag{3}$$

для строго возрастающей $\Psi(\cdot)$, и

$$\Psi(X) = F_Y^{-1}(1 - F_X(X)), \tag{4}$$

для строго убывающей $\Psi(\cdot)$.

Таким образом, порядок действий для решения задачи поиска функции $\Psi(\cdot)$ в случае одной входной X и одной выходной Y характеристик (даны их несогласованные выборки) следующий:

1) по выборке входной и выходной характеристик стандартными методами [5] подбираем функции распределения $F_X(x)$, $F_Y(x)$ соответственно;

2) из физических соображений характер монотонности функции $\Psi(\cdot)$ можно считать известным, поэтому по соответствующей из формул (3) или (4) находим искомую функцию $\Psi(\cdot)$.

Пример. Использование реальных выборок **в примере** неудобно: их функции распределения неизвестны, тем более неизвестна реальная функция $\Psi(\cdot)$. Следовательно, оценить, насколько найденная по реальным выборкам функция $\Psi(\cdot)$ соответствует реальной функции $\Psi(\cdot)$, будет невозможно. Поэтому зададим закон распределения входной выборки и функцию $\Psi(\cdot)$. Найдем тогда закон распределения выходной характеристики. Сгенерируем выборки входной и выходной характеристик. Оценим, насколько функция, найденная по этим сгенерированным выборкам, соответствует заданной.

Возьмем для входной характеристики закон распределения Рэлея, то есть функцию распределения

$$F_X(x)=\begin{cases}1-\exp\left(-\dfrac{x^2}{2a^2}\right), x>0,\\ 0, \qquad\qquad x\le 0,\end{cases} \tag{5}$$

где параметр положим $a=1$, а функцию формирования характеристики в ходе ТО положим равной $\Psi(X)=\sqrt{X}$. Сгенерируем выборку входной характеристики (приведен вариационный ряд сгенерированной выборки, все элементы которой округлены до сотых)

0.05, 0.12, 0.26, 0.27, 0.38, 0.38, 0.44, 0.44, 0.44, 0.47, 0.50, 0.58, 0.58, 0.62, 0.65, 0.65, 0.68, 0.71, 0.73, 0.74, 0.75, 0.77, 0.77, 0.79, 0.79, 0.81, 0.82, 0.83, 0.88, 0.88, 0.89, 0.91, 0.92, 0.93, 0.99, 1.02, 1.04, 1.05, 1.05, 1.05, 1.05, 1.08, 1.09, 1.11, 1.11, 1.11, 1.11, 1.13, 1.13, 1.13, 1.21, 1.22, 1.23, 1.23, 1.26, 1.31, 1.35, 1.36, 1.37, 1.37, 1.37, 1.38, 1.42, 1.42, 1.43, 1.44, 1.44, 1.46, 1.47, 1.47, 1.48, 1.49, 1.50, 1.50, 1.51, 1.52, 1.54, 1.54, 1.55, 1.57, 1.59, 1.60, 1.64, 1.70, 1.71, 1.72, 1.74, 1.74, 1.75, 1.85, 1.89, 1.92, 1.93, 2.04, 2.23, 2.23, 2.40, 2.41, 2.52, 2.63.

Выбираем количество интервалов равной длины равным 5 (при этом в интервалы попадает 11,31,39,13,6 наблюдений), вычисляем статистику критерия хи-квадрат для основной гипотезы, состоящей в том, что выборка имеет распределение Рэлея с неизвестным параметром a_X. Оцениваем этот параметр a из условия минимизации [6,7] статистики критерия, получаем $a_X=0.929480123$. При таком значении параметра соответствующее значение статистики критерия $\chi^2=7.12220596$.

Генерируем выборку выходной характеристики как $Y=\sqrt{X}$, где X имеет функцию распределения (5). Для этого сначала генерируем еще одну выборку из распределения (5), а затем извлекаем корни из всех элементов:

0.31, 0.42, 0.54, 0.56, 0.59, 0.63, 0.64, 0.64, 0.65, 0.65, 0.67, 0.69, 0.70, 0.72, 0.73, 0.74, 0.75, 0.75, 0.76, 0.77, 0.78, 0.78, 0.80, 0.80, 0.80, 0.80, 0.85, 0.86, 0.86, 0.86, 0.86, 0.88, 0.88, 0.88, 0.92, 0.92, 0.93, 0.95, 0.96, 0.97, 0.98, 0.98, 1.00, 1.01, 1.01, 1.01, 1.02, 1.03, 1.03, 1.04, 1.04, 1.05, 1.05, 1.07, 1.08, 1.08, 1.09, 1.09, 1.10, 1.11, 1.12, 1.12, 1.12, 1.14, 1.15, 1.17, 1.18, 1.18, 1.20, 1.20, 1.21, 1.23, 1.24, 1.27, 1.29, 1.29, 1.31, 1.31, 1.32, 1.32, 1.33, 1.33, 1.34, 1.36, 1.36, 1.36, 1.37, 1.40, 1.42, 1.42, 1.46, 1.47, 1.48, 1.49, 1.52, 1.54, 1.55, 1.58, 1.60, 1.83.

Теоретической функцией распределения выборки $Y=\sqrt{X}$ является

$$F_Y(y)=\begin{cases}1-\exp\left(-\dfrac{y^4}{2a^2}\right), y>0,\\ 0, \qquad\qquad y\le 0,\end{cases} \tag{6}$$

где значение параметра ранее выбрано $a=1$. Выбираем количество интервалов равной длины равным 5 (при этом в интервалы попадает 5,29,37,24,5 наблюдений),), вычисляем статистику критерия хи-квадрат для основной гипотезы, состоящей в том, что выборка имеет распределение (6) с неизвестным параметром a_Y. Оцениваем этот параметр a_Y из условия минимизации [6,7] статистики критерия, получаем $a_Y=0.944898197$2. При таком значении параметра соответствующее значение статистики критерия $\chi^2=1.570640983$.

По найденным функциям распределения входной и выходной характеристик из равенства (2) находим $\Psi(X)$.

$$1-\exp\left(-\frac{\Psi^4(x)}{2a_Y^2}\right)=1-\exp\left(-\frac{x^2}{2a_X^2}\right),\ \frac{\Psi^4(x)}{2a_Y^2}=\frac{x^2}{2a_X^2},\ \Psi(x)=\sqrt{\frac{a_Y}{a_X}x},\ \Psi(x)=1.008259817\sqrt{x}.$$

Заметим, что найденная функция отличается от теоретической мультипликативным коэффициентом 1.008259817. Конечно, в произвольном случае функцию $\Psi(X)$, как решение уравнения (6), придется строить численно.

Графическое решение задачи поиска доверительного интервала выходной (входной) характеристики по входной (выходной). Уравнение (2) позволяет графически решать, как прямую, так и обратную задачу определения изменения доверительных интервалов. На рисунке 2 построены графики некоторых функций распределения $F_X(x)$, $F_Y(x)$.

Пусть a – некоторая квантиль входной характеристики X. Решим по рисунку 2 прямую задачу, то есть найдем квантиль того же уровня выходной характеристики Y. Для этого нужно отметить точку $x = a$ на оси X и пройти по стрелке вверх от точки $x = a$ до пересечения с графиком функции $F_X(x)$, затем – по горизонтали до пересечения с графиком функции $F_Y(x)$, затем – вертикально вниз до пересечения с осью X. Получившееся значение $x = b$ и есть искомая квантиль выходной характеристики. Для решения обратной задачи следует начать с квантили выходной характеристики $x = b$ и двигаться в обратном направлении по тем же линиям.

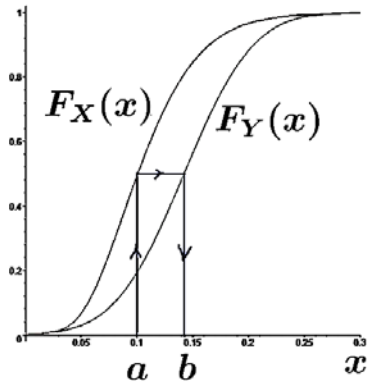


Рис. 2. Графическое решение задачи определения квантили выходной характеристики по квантили входной характеристики

Замечание 1. В случае, когда рассматривается зависимость выходной характеристики сразу от нескольких входных характеристик рассмотренный метод не работает, так как невозможно обратить функцию нескольких переменных.

Замечание 2. Если функция $\Psi(\cdot)$ построена сразу после наладки ТО, то возникновение существенного статистического различия между значениями элементов выборки выходной характеристики и значениями функции $\Psi(\cdot)$, получаемыми при подстановке элементов выборки входной характеристики, указывает на необходимость подналадки ТО. Говоря по-другому, стабильность функции $\Psi(\cdot)$ указывает на устойчивость технологического процесса [8].

Замечание 3. Предложенный метод позволяет рассматривать функцию преобразования характеристик нескольких последовательных ТО, которая строится как композиция функций отдельных ТО, и, следовательно, говорить о траектории формирования показателей качества изделия [9] и траектории жизненного цикла изделия [10].

Выводы:

1. Сформулирована задача поиска функциональной зависимости между входной и выходной характеристиками по их несогласованным выборкам.

2. Предложен метод решения такой задачи в одномерном случае, состоящий в нахождении по выборкам функций распределения входной и выходной характеристик и последующем решении функционального уравнения (2).

3. Приведен пример решения такой задачи.

4. Показано, что найденные функции распределения входной и выходной характеристик позволяют графически установить зависимость между входными и выходными доверительными интервалами.

Список литературы

1. Точность производства в машиностроении и приборостроении. Под. ред. А.Н. Гаврилова. М.: Машиностроение, 1973. 567 с.

2. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М., Мир, 1970. 368 с.

3. Винник П.М., Винник Т.В., Еськова Е.А. Математические задачи, возникающие при статистическом контроле технологических процессов машиностроительных производств // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. 2022. № 4. С. 24-30.

4. Винник П.М., Винник Т.В., Еськова Е.А. Математические задачи, возникающие при статистическом контроле технологических процессов машиностроительных производств // Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды пятнадцатой общероссийской научно-практической конференции. В 2-х томах. Сер. "Библиотека журнала "Военмех. Вестник БГТУ"" Санкт-Петербург, 2023 С.16-19.

5. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2006. 816 с.

6. Лемешко Б.Ю., Чимитова Е.В. О выборе числа интервалов в критериях согласия типа χ^2 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. С. 61–67.

7. ГОСТ Р 50.1-033-2001 Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2. М., Стандартинформ. 2006. 87 с.

8. Каплунов Р.С. Контроль качества деталей основных групп. М.: Изд-во стандартов. 1977. 200 с.

9. Хейфец М.Л. Моделирование процессов наследования показателей качества для компьютерной поддержки жизненного цикла изделий / М.Л. Хейфец, Г.Б. Прмент, А.С. Васильев, С.А. Клименко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки, 2009, №9. С. 19-24.

10. Афанасьев А.С., Вященко Ю.Л., Иванов К.М. Метрики информационной системы координат как инструменты управления рисками в проектировании системы оружия // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2022. № 3 (123). С. 51-58.

Винник Петр Михайлович, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, vinnik_pm@voenmeh.ru, Россия, Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

Винник Татьяна Викторовна, канд. техн. наук, доцент, vinnik.tv92@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),

Еськова Екатерина Александровна, ассистент, eskova_ea@voenmeh.ru, Россия, Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL FUNCTION FOR TRANSFORMATION OF CHARACTERISTICS IN TECHNOLOGICAL OPERATION

V.P. Vinnik, T.V. Vinnik, E.A. Eskova

To solve the problems of improving existing technological processes for emerging operational tasks and designing new technological processes, it is required to be able to determine the confidence intervals of input characteristics of workpieces for a technological operation by confidence intervals of output characteristics and vice versa. In mass production, tracking the trajectory of a particular workpiece is extremely difficult. Therefore, the samples of input and output characteristics should be considered as inconsistent. The article proposes a method for finding a functional relationship between the input and output characteristics, on the basis of which a relationship is established between confidence intervals.

Key words: quality, mass production, statistical analysis, unmatched sampling, dependence of generated properties on initial properties.

Vinnik Petr Mikhailovich, doctor of technical sciences, docent, head of department, vinnik_pm@voenmeh.ru, Russia, Saint-Petersburg, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,

Vinnik Tatyana Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, vinnik.tv92@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State Technological Institute,

Eskova Ekaterina Aleksandrovna, assistant, eskova_ea@voenmeh.ru, Russia, Saint-Petersburg, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov

УДК 620.17
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-680-681

НАПРАВЛЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ЛЕГКОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

М.В. Житный, В.В. Мартынов, Э.Г. Синельников, Н.А. Шуневич

В статье описываются проблемы, выявленные в ходе эксплуатации легкогазовой установки, проведен анализ причин возникновения неисправностей. Предложен вариант модернизации конструкции форкамеры легкогазовой баллистической установки на основе численного моделирования, который позволяет повысить ее надежность.

Ключевые слова: легкогазовая установка, форкамера, моделирование.

В процессе летной эксплуатации космический аппарат (КА) подвергается воздействию различных факторов космического пространства. Одним из факторов, оказывающих влияние на безопасность полетов, является воздействие малоразмерных твердых частиц (МТЧ) на элементы КА. Метеоры и космическая пыль чаще всего состоят из каменных и железных частиц плотностью 0,5 г/см^3, скорости которых относительно Земли изменяются в пределах 12...72 км/с в зависимости от направления движения [1]. Столкновения с метеорными частицами в зависимости от их размеров, количества, скорости и плотности, а также от места удара способны вызвать эрозию внешней поверхности оболочки герметичного отсека и отдельных элементов систем, пробои и откалывание частиц от внутренней поверхности оболочки корпуса, разрушение терморегулирующих покрытий. Это в свою очередь приводит к снижению рабочих характеристик, уменьшению срока активного существования КА либо выходу его из строя.

Среди известных способов защиты КА от воздействия метеорных тел наиболее востребованным является применение защитных экранов и многослойных силовых конструкций. Материалы и размеры этих конструкций выбирают так, чтобы при малых скоростях соударения экран мог противостоять пробивному воздействию метеорного тела, а при больших – обеспечить дробление последнего на мелкие частицы, исключающие недопустимые повреждения защищаемого отсека (элемента) КА. Разработка эффективных экранов невозможна без проведения

моделирование процессов, возникающих в ходе высокоскоростного соударения, что требует проведения экспериментальных исследований высокоскоростного соударения МТЧ с имитаторами элементов КА. К комплексам, решающим данную задачу, предъявляется ряд требований, одним из которых является обеспечение требуемой скорости столкновения имитаторов МТЧ с исследуемыми образцами [2].

В Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского для проведения экспериментальных исследований высокоскоростного соударения имитатора МТЧ с исследуемой поверхностью используется экспериментальный баллистический комплекс БС-3, основой которого является легкогазовая установка (ЛГУ) [3]. Данная ЛГУ обеспечивает разгон имитатора МТЧ в интервале от 1000 до 5000 м/с. Схема данной легкогазовой установки приведена на рис. 1.

Принцип действия установок такого типа заключается в метании тел лёгким газом (водородом, гелием), предварительно сжатым при помощи поршня, ускоренного в камере сжатия продуктами сгорания порохового заряда. При этом процесс выстрела сопровождается повышенными ударными нагрузками на элементы установки. Поскольку конструктивные характеристики установки (калибр, длина ствола, размеры камеры предварительного сжатия и др.) не могут быть изменены без существенных материальных затрат, то задача увеличения скорости метаемого тела решается в большинстве случаев за счет интенсификации процессов, влияющих на ускорение поршня и, как следствие, на степень сжатия легкого газа.

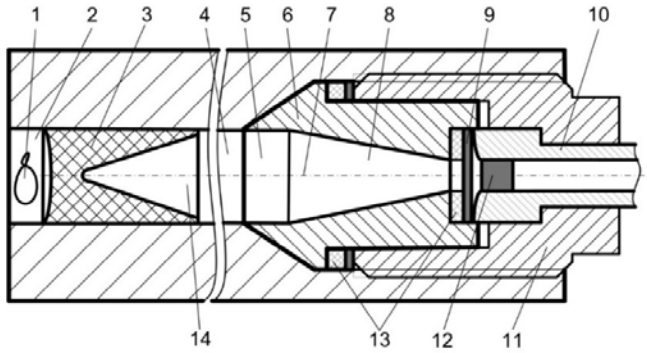


Рис. 1. Схема легкогазовой установки: 1 – пороховой заряд; 2 – зарядная камера; 3 – деформируемый поршень; 4 – камера сжатия; 5 – объем цилиндрической формы; 6 – форкамера; 7 – канал форкамеры; 8 – объем конической формы; 9 – мембрана; 10 – баллистический ствол; 11 – поджимная гайка; 12 – метаемое тело (частица); 13 – уплотнения; 14 – открытая полость деформируемого поршня

Реализация данного подхода привела к увеличению нагрузки на форкамеру ЛГУ, которая непосредственно воспринимает действие кинетической энергии поршня, разогнанного пороховыми газами до высокой скорости. Что способствовало возникновению процесса трещинообразования (рис. 2).

Рис. 2. Вид повреждения форкамеры

Уменьшение срока службы форкамеры, привело к снижению надежности установки в целом и увеличению временных затрат персонала на замену поврежденного элемента в процессе проведения экспериментов.

Для анализа причин возникновения данного явления было проведено моделирование процесса ударного воздействия поршня на форкамеру в специальном программном обеспечении ANSYS, которые представлены на рис 3.

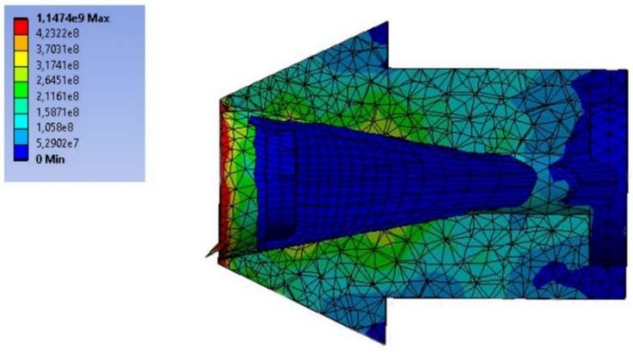


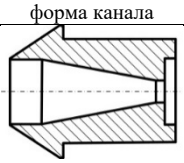
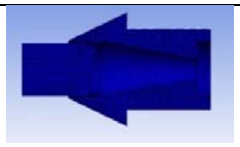
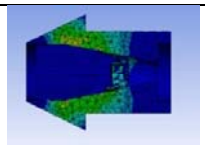
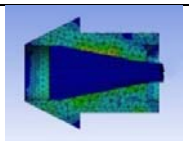
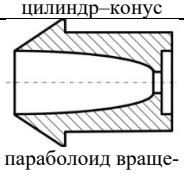
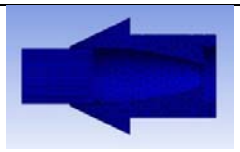
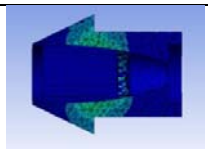
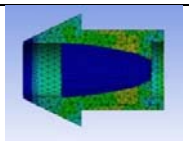
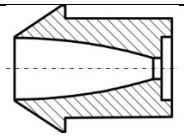
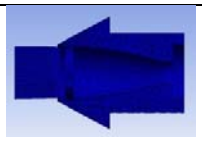
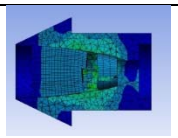
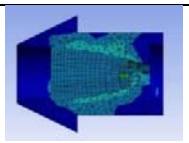
Рис. 3. Графическое представление результатов моделирования форкамеры

Результаты моделирования показали, что наиболее нагруженным местом форкамеры является заходная часть внутреннего конуса. В данном месте форкамера имеет минимальную толщину стенок, что, в конечном счете, приводит к возникновению разрушений.

Одним из возможных вариантов решения проблемы является доработки конструкции форкамеры за счет изменения формы ее канала. Были разработаны модели форкамер с различными формами каналов, для каждого из которых было проведено моделирование распределения напряжений при ударном взаимодействии с поршнем. Результаты моделирования для некоторых типов форкамер представлены в таблице

Анализ полученных результатов показывает, что изменение конструкции форкамеры приводит к изменению начальной точки ее взаимодействия с поршнем. Это обеспечивает смещение зоны повышенных напряжений в более прочную часть детали.

Результаты моделирования ударного воздействия поршня на форкамеру

Фото	Схема, форма канала	Результаты моделирования нагрузок в ANSYS		
Предлагаемая конструкция	 цилиндр–конус			
	 параболоид вращения			
	 оживальная			

Таким образом, предлагаемые изменения конструкции форкамеры, полученные на основе результатов численного моделирования, позволяют повысить надежность легкогазовой установки, снизить суммарные материальные затраты, необходимые для подготовки и проведения натурных испытаний на экспериментальном баллистическом комплексе БС-3. Кроме того предлагаемое конструктивное решение обеспечивает улучшение технических характеристик ЛГУ без внесения дополнительных изменений в другие элементы ее конструкции.

Список литературы

1.Модель космоса: научно-информационное издание – Т.1: физические условия в космическом пространстве / Под ред. М.И.Панасюка, Л.С. Новикова. М.: КДУ, 2007. 872 с.

2.Экспериментальный баллистический комплекс / А.М. Бабин [и др.] // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. Вып. № 3–4. СПб.: 2013. С. 120–122.

3.Тимофеев Н.М. Экспериментальный баллистический комплекс / П.С.Гончаров, А.М.Денисов, М.А. Светлорусов и др. // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2013. №3-4. С.120-122.

Житный Михаил Владимирович, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, vka@mil.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Синельников Эдуард Геннадьевич, старший научный сотрудник, Россия, Санкт- Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Мартынов Виктор Васильевич, старший научный сотрудник, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Шуневич Николай Александрович, канд. техн. наук, начальник лаборатории, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

DIRECTIONS OF MODERNIZATION OF THE LIGHT-GAS INSTALLATION

M.A. Zhitnyy, V.V. Martynov, E.G. Sinelnicov, N.A. Shunevich

The article describes the problems identified during the operation of a light-gas installation, analyzes the causes of malfunctions. A variant of modernization of pre-chamber design of light-gas ballistic installation based on numerical modelling is proposed, which allow to increase its reliability.

Key words: light-gas installation, pre-chamber, modelling.

Zhitnyy Mikhail Vladimirovich, candidate of technical science, docent, senior researcher, vka@mil.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Martynov Viktor Vasilievich, senior researcher, Russia, Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Sinelnicov Eduard Gennadievich, senior researcher, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy,

Shunevich Nikolay Aleksandrovich, candidate of technical sciences, head of the laboratory, Russia, Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 658.5+621.9
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-683-684

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ УСТАНОВКЕ В ЦЕНТРАХ

И.А. Александров, А.Н. Муранов, А.А. Татарканов, С.А. Шептунов

Токарная обработка деталей на станках с установкой в центрах является широко распространенной, но несмотря на её эффективность в процессе обработки деталей всё же возникают различного рода смещения и погрешности установки. В связи с этим, целью данной работы является экспериментальное определение основных факторов, которые влияют на погрешности расположения поверхностей, и также количественно оценить уровень их влияния. В работе описаны проведенные эксперименты и представлен анализом их результатов. Были построены эмпирические кривые распределения погрешностей, в результате чего показано, что погрешность расположения главным образом зависит от радиального биения конуса вращающегося центра в ненагруженном состоянии.

Ключевые слова: центр, токарная обработка, погрешность расположения.

Для установки деталей в центрах токарных станков применяют задние центры неподвижные или вращающиеся. В процессе обработки деталей с применением неподвижного центра в задней бабке происходит неравномерный износ по окружности центровой фаски заготовки. Такое явление вызывает смещение оси центровых фасок от первоначального положения. В результате смещения оси центровых фасок возникают погрешности расположения обработанных поверхностей относительно первоначального положения оси центровых фасок или поверхностей, обработанных на предыдущих операциях [1-3]. При этом, величина смещения оси центровых фасок будет зависеть от целого ряда случайных факторов. Основными из которых являются:

1) неравномерность снимаемого припуска в поперечном сечении обрабатываемой поверхности заготовки;

2) вид обработки, т. е. черновая или чистовая обработка;

3) размер и качество центровой фаски, т.е. чистота обработки и неравномерная ширина фаски по окружности;

4) неодинаковая структура и твердость металла заготовки по окружности центровой фаски.

При обработке деталей с вращающимся задним центром, центра и заготовка вращаются с одинаковым числом оборотов, поэтому здесь неравномерный износ центровых фасок отсутствует. Однако и в этом случае появляется погрешность расположения обработанной поверхности относительно оси центровых фасок [4]. Эта погрешность вызывается погрешностью установки заготовки, которая образуется за счет несовпадения оси корпуса центра с осью вращения центра и кроме этого, влиянием случайных факторов, действующих в процессе обработки. Так, на рис. 1 представлена схема установки заготовки во вращающихся центрах, в случае, когда ось центровых фасок, т. е. установочная база не совпадает с осью вращения заготовки у переднего центра на величину a_1 а *у* заднего центра на $– a_2$. Смещения осей на a_1 и a_2 создают биение установленной заготовки в центрах относительно оси вращения. Величина смещения осей a_1 обычно меньше, чем a_2 и, кроме этого, она может быть доведена до очень малого значения при правильной установке переднего центра или при обработке конуса центра непосредственно на станке после его установки. Поэтому в данной работе рассматриваются только погрешности расположения поверхностей детали, возникающие за счет заднего центра.

Погрешности расположения поверхностей при обработке деталей в центрах приводят к необходимости увеличения припусков на дальнейшую обработку. Таким образом, знание величин погрешностей расположения поверхностей после обточки в центрах необходимо не только для обеспечения точности обработки деталей, но и для расчета припусков на дальнейшую обработку [5,6]. Целью настоящего исследования является экспериментальное определение влияния основных факторов на погрешности расположения поверхностей и оценка величины этих погрешностей при обработке заготовок с применением неподвижных и вращающихся центров в задней бабке токарного станка.

Экспериментальное исследование погрешностей расположения поверхностей деталей, обработанных на токарном станке с применением неподвижного центра в задней бабке, проводилось по следующей методике.

Заготовки, отрезанные от круглого проката, зацентровывались центровым сверлом и на заднем конце заготовки протачивался контрольный поясок на длине 5–6 мм. Такие заготовки устанавливались в центре токарного станка, где с малой подачей снимался незначительный слой металла с контрольного пояска, этим добивались нулевого биения пояска относительно оси центров станка, а затем обтачивали заготовку по поверхности *А* (рис. 2).

В рамках исследования в каждом опыте обрабатывалась партия заготовок, состоящая из 50…100 штук. Исследованиями установлено влияние на погрешность расположения поверхностей следующих факторов:

1) Размеров заготовок, которые принимались диаметром 25, 50, 75 и 100 мм с длиной от 150 до 400 мм из стали марки СТ-45 и 12ХН3А.

2) Состояния торцев заготовок, которые были после отрезки и после подторцовки в одну установку с зацентровкой.

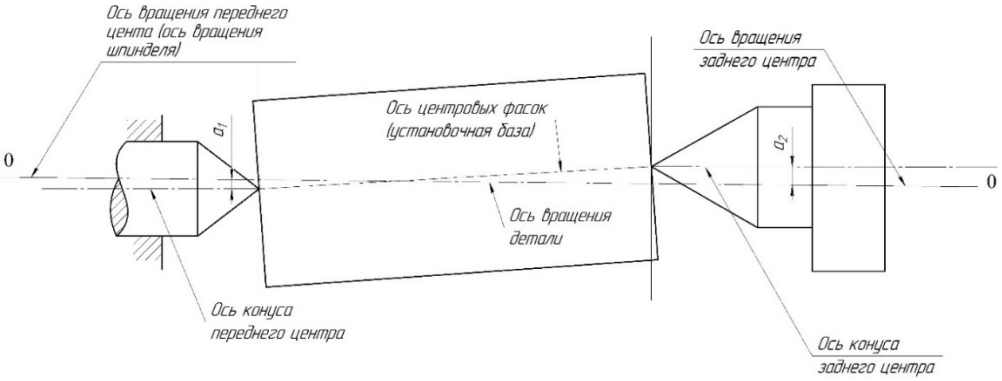


Рис. 1. Смещения при установке заготовки во вращающихся центрах

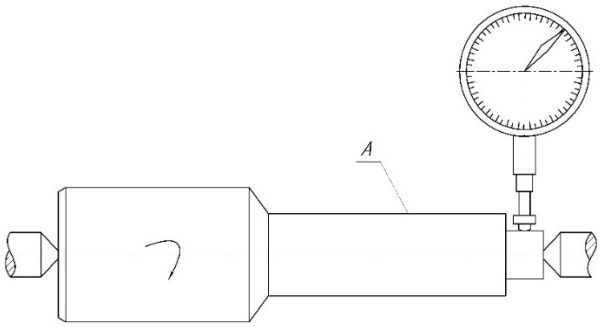


Рис. 2. Обточенная заголовка установлена в центре мерительного приспособления с индикатором с ценою деления 0,002 мм для измерения биения контрольного пояска

3) Размеров центровых гнезд с уменьшением диаметра центровых фасок на 30%.

4) Состояния заднего центра, которые применялись новые и изношенные.

5) Биения заготовок до обточки, вызванное неточностью зацентровки было от 0,3 до 0,6 и в отдельных опытах до 3,5 мм.

6) Влияние материала и геометрии резца, которые были изготовлены из быстрорежущей стали и из твердого сплава с нормальной геометрией и главным углом в плане 45° и 90°.

7) Режимов резания, которые выбирались применительно к чертовой и чистовой обработке при нормальных условиях работы.

Исследования показали, что основным фактором, влияющим на неравномерность износа центровой фаски при обработке с неподвижным задним центром, является неравномерность припуска в поперечном сечении заготовки, т. е. биение заготовки. Все остальные факторы оказывают незначительное влияние на неравномерность износа центровых фасок.

Экспериментальное исследование погрешностей расположения поверхностей деталей, обработанных на токарном станке с применением вращающегося центра в задней бабке, проводилось по следующей методике.

Для исследования применялись заготовки диаметром 25 и 75 мм, отрезанные от прутка из стали 45. Заготовки зацентровывались с двух сторон на токарном станке с нормальными размерами центровых гнезд.

Таблица 1

Величины погрешностей расположения поверхностей при обработке заготовок с применением неподвижного заднего центра

Вид обработки	Биение заготовки до обточки в мм	Погрешность расположения поверхностей в мм (биение)
Черновая обточка …	до 0,6	0,03
» » …	до 3,5	0,06
Чистовая обточка …	до 0,3	0,01

Подготовленные заготовки устанавливались во вращающиеся центра на токарном станке и обтачивались на длине 100 мм с черновыми или чистовыми режимами резания. На конце обточенной поверхности со стороны заднего центра зачищался контрольный поясок на длине 5−6 мм. Обработанная заготовка устанавливалась в центре мерительного приспособления и по контрольному пояску измерялось биение обточенной поверхности.

Для опытов использовались новые, средне-изношенные и сильно-изношенные вращающиеся центра, предназначенные для средних нагрузок с хвостовиком Морзе № 4. Новый центр по точности отвечал техническим условиям и имел радиальное биение конуса центра в ненагруженном состоянии 0.006 мм.

За средне-изношенный центр принимали такой центр, который проработал некоторое время и имел износ. Проверив в условиях производства, несколько таких центров было установлено, что радиальное биение конуса центров в ненагруженном состоянии составляет 0,03−0,07 мм. В исследованиях нами применялись средне-изношенные центра с радиальным биением конуса 0,05 мм.

За сильно-изношенный центр принимали такой, который проработал длительное время на черновых работах и имел большой износ. Проверив в условиях производства, несколько таких центров было установлено, что

радиальное биение конуса центров в ненагруженном состоянии составляет от 0,18 до 0,28 мм. Нами в исследованиях использовался сильно-изношенный центр с биением 0,25 мм.

Методика исследования предусматривала выяснить зависимость погрешности расположения поверхностей деталей, обточенных во вращающихся центрах от следующих основных факторов:

1) диаметра заготовки;

2) вида обработки, т. е. черновая или чистовая обработка;

3) состояния вращающегося центра в задней бабке, т. е. нового, средне-изношенного и сильно-изношенного центра.

По результатам исследования для каждого опыта были построены фактические кривые распределения погрешностей расположение поверхностей (биений) деталей. Для каждой фактические кривой определялись среднее значение случайных величин ($X_{ср}$) и среднее квадратичное отклонение случайных величин (σ).

Для примера на рисунках. 3, 4, 5 приведены аппроксимирующие распределения (пунктир) и фактические кривые (сплошная лилия) при работе с новым, средне-изношенным и сильно-изношенным вращающимся задним центром.

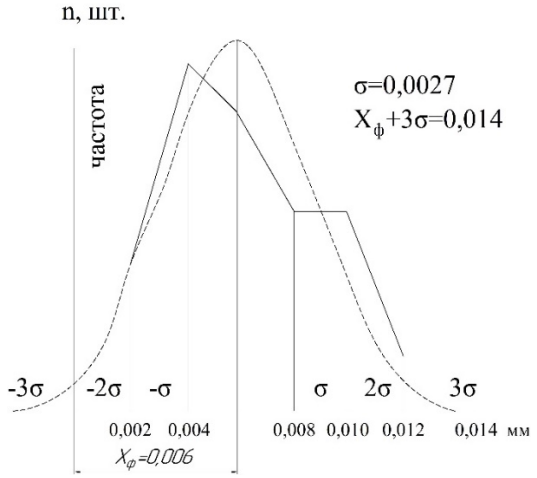


Рис. 3. Распределение при работе с новым вращающимся задним центром

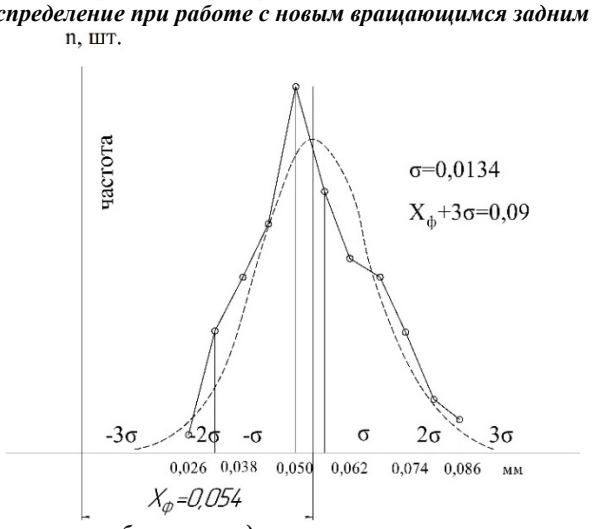


Рис. 4. Распределение при работе со средне-изношенным вращающимся задним центром

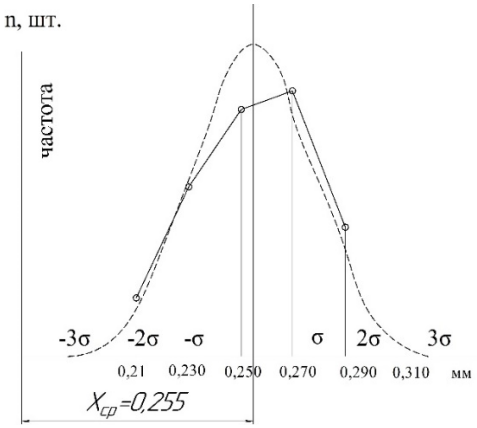


Рис. 5. Распределение при работе с сильно-изношенным вращающимся задним центром

Существенно положительные величины (биения, эксцентриситет и т. п.) теоретически распределяются по закону эксцентриситета (закон Максвелла) [7-9]. Однако такое распределение справедливо только в том случае, когда центр группирования совпадает с началом координат. В этом случае кривая Максвелла имеет крутую восходящую и пологую нисходящую ветви. При наличии смещения центра группирования от начала координат кривая изменяет свою форму и становится все более пологой и симметричной, приближаясь к виду нормальной кривой Гаусса. Когда центр группирования смещен от оси координат на величину, равную или большую 3σ, т.е. $X_{ср} > 3\sigma$, то кривая принимает вид кривой нормального распределения. Смещение центра группирования от оси координат вызывается наличием постоянной систематической погрешности.

Из анализа практических кривых установлено, что при работе на средне-изношенных и сильно-изношенных вращающихся центрах, центр группирования смещен от оси координат больше чем на 3σ. Следовательно, в этих случаях обработки, распределение погрешностей расположения поверхностей (биений) деталей подчиняется закону нормального распределения (рис. 4, 5).

При работе на новом вращающемся центре центр группирования также смещен от оси координат, но величина смещения несколько меньше, чем 3σ. Однако и в этом случае практическая кривая ближе подходит к кривой нормального распределения. Поэтому, для практических целей с некоторым допущением, и для этой кривой (рис. 3) можно применить закон нормального распределения. Следует еще учесть и то, что при применении закона нормального распределения упрощаются расчеты погрешностей.

Корректность применения закона нормального распределения биений, поверхностей, обработанных во вращающихся центрах, подтверждается еще и тем, что теоретические кривые (пунктирные линии) дают хорошее совмещение с практическими кривыми (рис. 3, 4 и 5).

На рис. 3, 4, 5 видно, что центр группирования смещен от оси координат соответственно на 0,006, 0,054 и 0,255 мм. Эти величины совпадают или очень близко приближаются к радиальному биению конусов, в ненагруженном состоянии, вращающихся центров, применяемых в исследовании. Следовательно, постоянной систематической погрешностью, которая сдвигает центр группирования, является радиальное биение конуса вращающегося центра в ненагруженном состоянии. Величина постоянной погрешности зависит от состояния центра, т. е, от точности изготовления и износа.

Рассеивание биений относительного центра группирования вызывается случайными факторами, к которым следует отнести:

1) радиальную жесткость вращающегося центра;

2) непостоянство силы поджатия вращающегося заднего центра при обработке, что влияет на жесткость центра;

3) изменение сил резания за счет колебания величины припуска в партии обрабатываемых заготовок.

Практическая зона рассеивания случайных величин, подчиняющихся закону нормального распределения, принимается равной ±3σ. Тогда предельные значения биении будут равны $X_{ср} \pm 3\sigma$. В практике, обычно, интересуются наибольшими значениями биения обработанных поверхностей на вращающихся центрах, которые равны $X_{ср} + 3\sigma$.

Таблица 2

Величины наибольшей погрешности расположения поверхностей (биений), обработанных на вращающихся центра, предназначенных для средних нагрузок в зависимости от вида обработки, состояния центра и величины снимаемого припуска с заготовки

Вид обработки	Припуск на диаметр в мм	Погрешности расположения поверхностей (биения) в мм		
		центр новый	центр средне-изношен.	центр сильно- изношен.
Черновая обточка …	2−3	0,014	0,07−0,1	0,23−0,32
» » …	3,5−5	−	0,1−0,13	0,32−0,36
Чистовая обточка …	0,8−2	0,01	−	−

Полученные результаты исследования показывают, что погрешность расположения поверхностей деталей зависит, главным образом, от постоянной погрешности, т. е. от радиального биения конуса вращающего центра в ненагруженном состоянии. Эта погрешность составляет от общей наибольшей погрешности расположения поверхностей от 45 до 75%.

В заключение следует отметить, что проведенные исследования имеют практическое значение, т. к. полученные результаты позволяют технологам:

1) в зависимости от заданного допуска на расположение поверхностей обоснованно выбрать конструкцию и состояние заднего центра;

2) заранее предвидеть величину ожидаемой погрешности расположения поверхностей при обработке в центрах;

3) знать величину биения поверхностей, обработанных в центрах, которая необходима для расчета припусков на дальнейшую механическую обработку.

Список литературы

1. Гаврилов В.А. Определение обобщенных сил при обработке деталей на токарном станке с различными схемами закрепления // Омский научный вестник. 2006. № 6(41). С. 86-88.

2. Сергеев А.С. Разработка математических моделей расчета параметров шероховатости при обработке деталей на токарных и фрезерных станках с ЧПУ // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых : материалы Международной молодежной научной конференции. Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2012. Том 3. С. 160-163.

3. Брылев А.В. Исследование кривизны оси обрабатываемого вала при базировании в центрах с использованием неподвижного люнета / А.В. Брылев, С.С. Михеев // Главный механик. 2021. № 5. С. 48-55. DOI 10.33920/pro-2-2105-05.

4. Воропаев В.В. Финишная технология обработки плоской поверхности фрикционным упрочнением и тон-

ким фрезерованием на обрабатывающем центре / В. В. Воропаев, В. П. Кузнецов, А. А. Попов // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2017. № 2(41). С. 165-169. EDN YPZFDH.

5. Аникеева О.В. Моделирование образования погрешностей расположения поверхностей при обработке деталей на токарных станках / О. В. Аникеева, А. Г. Ивахненко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VIII Международной научно-технической конференции: в 2 частях. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2011. С. 304-308.

6. Малкина И.В. Автоматизация контроля качества геометрических параметров деталей в машиностроении // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24, № 3(107). С. 34-41. DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-34-41.

7. Драчев О.И. Бессиловая и термосиловая обработка высокоточных деталей. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2019. 244 с.

8. Тимирязев В.А. Основы технологий машиностроительных производств: Учебник / В. А. Тимирязев, А. Г. Схиртладзе. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2022. 368 с.

9. Макаров В.Ф. Резание материалов: Учебник. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2022. 472 с.

10. Маслов А.Р. Резание металлов в автоматизированном производстве: учебное пособие для бакалавров. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2021. 300 с.

Александров Ислам Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, alexandrov@ikti.ru, Москва, Россия, Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук,

Муранов Александр Николаевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, muranov@ikti.ru, Россия, Москва, Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук,

Татарканов Аслан Адальбиевич, научный сотрудник, tatarkanov@ikti.ru, Россия, Москва, Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук,

Шептунов Сергей Александрович, д-р техн. наук, директор, ship@ikti.ru, Россия, Москва, Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

QUALITY CONTROL OF MECHANICAL PROCESSING OF PARTS WHEN INSTALLED IN CENTERS

I.A. Alexandrov, A.N. Muranov, A.A. Tatarkanov, S.A. Sheptunov

Turning of parts on machines with installation in centers is widespread, but despite its effectiveness, various types of displacements and installation errors still arise during the processing of parts. In this regard, the purpose of this work is to experimentally determine the main factors that influence the errors in the location of surfaces, and also to quantify the level of their influence. The work describes the experiments performed and presents an analysis of their results. Empirical error distribution curves were constructed, as a result of which it was shown that the location error mainly depends on the radial runout of the rotating center cone in the unloaded state.

Key words: center, turning, position error.

Alexandrov Islam Aleksandrovich, candidate of technical sciences, senior researcher, alexandrov@ikti.ru, Russia, Moscow, Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences,

Muranov Alexander Nikolaevich, candidate of technical sciences, senior researcher, muranov@ikti.ru, Russia, Moscow, Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences,

Tatarkanov Aslan Adal`bievich, research associate, tatarkanov@ikti.ru, Russia, Moscow, Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences,

Sheptunov Sergej Alexandrovich, doctor of technical sciences, director, ship@ikti.ru, Russia, Moscow, Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences

УДК 621.833
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-688-689

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ FFF ИЗ САЖЕНАПОЛНЕННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ

В.М. Кондратова, П.А. Петров, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин, Н.С. Шмакова

В работе исследуются электрические свойства образцов, изготовленных из саженаполненной полимерной композиции с помощью 3D-печати методом FFF (Fused Filament Fabrication). Технологические параметры процесса изготовления филамента подбирались таким образом, чтобы он имел гладкую поверхность и его диаметр не менялся по длине с точностью до ± 0,05 мм. Показано, что напечатанные изделия могут использоваться вместо изделий, полученных традиционными методами в тех случаях, когда ток течёт вдоль слоев. Для расширения областей их применения необходимо подобрать параметры печати, снижающие анизотропию электропроводности.

Ключевые слова: композиционный материал, полилактид, полиэтилен, технический углерод, электропроводность, 3D- печать, метод FFF.

В настоящее время аддитивные технологии из превратились в один из эффективных способов получения деталей и изделий, востребованных практически во всех отраслях промышленности: от медицины до космического машиностроения и от сельского хозяйства до военной техники. Если говорить о полимерном направлении в аддитивных технологиях, то можно отметить постоянное расширение спектра решаемых задач, а также увеличение ассортимента используемых термопластичных полимерных расходных материалов и композиционных материалов на их основе.

От изготовления оригинальных сувенирных изделий и создания прототипов новой продукции аддитивные технологии переходят к более сложным задачам: производству корпусов для малых серий электронного оборудования, декоративных элементов одежды, замену для вышедших из строя гибких прокладок сложной формы, датчиков различного назначения и многих других изделий [1].

Расходные полимерные материалы не ограничиваются сейчас полимерами общего назначения, декоративными и инженерными композиционными материалами. В настоящее время все чаще требуются материалы со специальными свойствами: магнитными, оптическими, тепловыми, биоцидными и многими другими.

Не стали исключением и электрические свойства. Все чаще требуется композиционный полимерные материал не просто с определенным уровнем электропроводности, а с конкретной функциональной зависимостью электропроводности от температуры, деформации, частоты электрического поля, химического состава атмосферы и других внешних факторов. Они нужны для изготовления антистатических изделий, электромагнитных экранов отражающего и поглощающего типов, датчиков деформации, температуры, влажности, наличия в атмосфере определенных вредных веществ, электропроводящих паст для дорожек на печатных платах и многих других применений [2]. Специалист, привыкший к широкому ассортименту композиционных материалов со специальными электрическими свойствами, перерабатываемых в изделие традиционными способами, хотел бы иметь возможность использовать в своей работе такие же, но пригодные для 3D-печати. Однако здесь имеется ряд проблем. Одна из них заключается в крайне небольшом ассортименте расходных материалов, обладающих специальными электрическими свойствами. Вторая проблема носит научный характер. Изделие, изготовленное с помощью аддитивных технологий, имеет электрические свойства, как правило, отличающиеся от свойств изделия, полученного традиционными методами, даже если они изготовлены из одного и того же материала [3, 4]. Есть необходимость прогнозировать свойства конечного изделия, исходя из свойств расходного материала, метода и технологических параметров печати. Но если электрическим свойствам образцов, полученных традиционными методами, посвящена обширная научная литература - сотни тысяч статей, тысячи монографий, то особенности электрических свойств изделий, полученных с использованием аддитивных технологий изучены крайне слабо.

Поэтому целью настоящей работы является исследование особенностей электропроводности образцов, изготовленным с помощью 3D-печати методом FFF из саженаполненного полимерного материала. Рассмотрены зависимости электропроводности от концентрации наполнителя, частоты электрического тока.

Материалы и методы. Изготовление филаментов. Сажа (технический углерод) представляет собой наночастицы, которые из-за активной поверхности очень сложно вводить в полимерную матрицу. Для этого требуется дорогостоящее оборудование, например, двухшнековые экструдеры с высоким соотношением длины шнека к его диаметру. В противном случае распределение частиц технического углерода в изделии будет неоднородным, что отрицательно скажется на его свойствах. Поэтому мы использовали технологию, широко распространенную в полимерной отрасли, при которой компания-производитель добавок для модификации свойств полимеров и имеющая специальное оборудование для совмещения полимера с наполнителем, выпускает так называемые суперконцентраты, содержащие высокую концентрацию частиц наполнителя, равномерно диспергированного в полимерной матрице. Производители конечных изделий из полимерных композитов разбавляют суперконцентрат полимером, не содержащим наполнитель, используя стандартное смесительное оборудование, например, одношнековый экструдер.

В качестве суперконцентрата нами был выбран КС-45, производства АО «Лидер-Компаунд», представляющий собой полиэтилен, содержащий 45% масс. технического углерода. Для варьирования концентрации технического углерода в изделии гранулы КС-45 смешивались с гранулами ненаполненного полилактида марки L175 в различных пропорциях. Смесь гранул загружалась в экструзионную линию для получения филаментов WellZoom I**,** плавилась и перемешивалась в одношнековом экструдере, а затем на выходе из экструдера филамент, находящийся в расплавленном состоянии, вытягивался так, чтобы его диаметр был 1,75 мм – один из трех стандартных диаметров по ГОСТ Р 59100-2020 исходного материала для большинства 3D-принтеров, реализующих экструзионную технологию. Технологические параметры процесса изготовления филамента подбирались таким образом, чтобы полученный филамент имел гладкую поверхность и его диаметр не менялся по длине с точностью до ±0,05 мм.

Были изготовлены филаменты из неразбавленного суперконцентрата, а также его смесей с полилактидом в соотношении 1:1; 1:2; 1:3; 1:4; 1:5 и 1:7, что соответствует объемной концентрации технического углерода в композите 27; 14; 9,3; 7; 5,7; 4,7; 3,5% об., соответственно. В табл. 1 приведены технологические параметры, подобранные для получения филамента, пригодного для 3D-печати методом FFF.

Таблица 1

Технологические параметры получения филаментов с различным содержанием технического углерода

Технологические параметры	Концентрации технического углерода, v об.%						
	27	14	9,3	7	5,7	4,7	3,5
Температура в зоне плавления/ Температура на выходе, ℃	185/ 183	185/ 183	185/ 183	185/ 183	185/ 183	185/ 183	185/ 183
Скорость выдавливания, мм/мин	1400	1000	1100	1000	1000	1000	1200
Диаметр филамента, мм	1,73	1,75	1,77	1,75	1,75	1,75	1,77

3D-печать образцов. Из полученных филаментов с помощью 3D-принтера марки Ender-3 были изготовлены образцы для измерений электрических свойств. Предварительно были подобраны режимы печати:

скорость печати;

температура сопла;

температура рабочего стола;

высота слоя.

Для печати всех образцов был выбран один из наиболее часто используемых рисунков заполнения – прямолинейный (Linear), причем направление укладки четных слоев было перпендикулярно направлению укладки нечетных слоев.

Для измерения электропроводности в плоскости образца на постоянном токе изготавливали пластины размерами 50x10x2 мм. Направление укладки составляло 45^0 к длинной стороне пластины. Количество слоев было четным. Образцы для измерения электропроводности и диэлектрической проницаемости в переменном электрическом поле были изготовлены в виде диска диаметром 30 мм и толщиной 2 мм. В табл. 2 приведены режимы 3D печати образцов.

Таблица 2

Параметр печати образцов

Параметры	Образцы в виде диска	Образцы в виде пластины
Скорость печати, мм/сек	40	40
Температура сопла, ℃	195	195
Температура стола, ℃	70	70
Плотность заполнения, %	100	100
Рисунок заполнения	Прямолинейный	Прямолинейный
Заглаживание	Все верхние поверхности	Без заглаживания
Высота слоя, мм	0,08	0,08

Методы измерения электрических свойств образцов. В работе исследовались следующие электрические свойства:

Электропроводность на постоянном токе филаментов вдоль оси филамента - $\sigma_{ф}$.

Электропроводность на постоянном токе вдоль направления укладки четных - σ_{dc1} и нечетных - σ_{dc2} слоев.

Электропроводность на постоянном токе перпендикулярно плоскости образца - $\sigma_{dc}\perp$.

Электропроводность в переменных полях в диапазоне частот 20 Гц -5 МГц - $\sigma_{ac}\perp$.

Удельная электропроводность на постоянном токе определялась по ГОСТ 20214-74 «Пластмассы электропроводящие. Метод определения удельного объемного электрического сопротивления при постоянном напряжении». Для измерений применялся Измеритель LCR марки LCR-78105G (производство компании GwInstek). Прибор использовался в режиме измерения сопротивления на постоянном токе.

Образцы для измерений $\sigma_{ф}$ представляли собой отрезок филамента длиной 50 мм. Образцы для измерения σ_{dc1} и σ_{dc2} имели размер 10x10x2 мм и вырезались из пластины 50x10x2 мм таким образом, чтобы стороны квадрата были параллельны или перпендикулярны нитям верхнего слоя. Образцы для измерения $\sigma_{dc}\perp$ и $\sigma_{ac}\perp$ были изготовлены в виде диска диаметром 30 мм и толщиной 2 мм. Для создания низкоомного контакта образца с прибором использовалась проводящая паста на основе серебра марки MCN-DJ002 (компания Mechanic, Китай). Паста наносилась на плоские грани диска, торцы отрезка филамента и соответствующие торцевые поверхности образцов для измерения σ_{dc1} и σ_{dc2} и после выдержки 20 мин при температуре 70ºС образовывала высокопроводящие электроды. Токовые электроды и электроды напряжения Измерителя LCR попарно присоединялись к образцу, одна пара к одному электроду образца, другая к второму. Требование ГОСТ 20214-74, чтобы сопротивление электродов и контактное сопротивление были как минимум в 100 раз меньше сопротивления образца выполнялось для всех проведенных измерений. Проводилось 3 измерения сопротивления исследуемого образца. Результаты измерений усреднялись.

Электропроводность в переменных полях ($\sigma_{ac}\perp$) в диапазоне частот 20 Гц -5 МГц при комнатной температуре и в диапазоне температур 20 – 110 °С определялась методом широкодиапазонной диэлектрической спектроскопии с помощью Измерителя LCR марки LCR-78105G (производство компании GwInstek).

Результаты и их обсуждение. В табл. 3 и на рис. 1 приведены зависимости электропроводности на постоянном токе от объемной концентрации технического углерода (v) для филаментов, а также образцов, напечатанных из этих филаментов.

Все концентрационные зависимости, приведенные на рис. 1 имеют вид, типичный для полимерных композитов с электропроводящим наполнителем: в некотором диапазоне концентраций, называемом порогом протекания, наблюдается резкое изменение электропроводности. Обращает на себя внимание тот факт, что если значения

электропроводности в плоскости напечатанных слоёв σ_{dc1} и σ_{dc2} ненамного, примерно в 2 раза ниже электропроводности филамента, то $\sigma_{dc\perp}$ на три - пять порядков ниже $\sigma_ф$, причем с уменьшением концентрации наполнителя коэффициент анизотропии электропроводности К= $\sigma_{dc1}/\ \sigma_{dc\perp}$ увеличивается. Это позволяет сделать вывод, что электропроводность единичного слоя вдоль направления укладки нити близка к электропроводности филамента, перенос же носителей зарядов в перпендикулярном направлении, между соседними нитями, существенно затруднён. Причём как в плоскости образца, так и по толщине.

Таким образом, в напечатанном образце мы имеем два варианта переноса носителей зарядов: вдоль нити и между соседними нитями. При измерении электропроводности σ_{dc1}, основной вклад в нее дают четные слои, перенос носителей зарядов по нечетным слоям практически не заметен. В случае измерения σ_{dc2} наблюдается обратная ситуация: основной перенос носителей зарядов осуществляется по нечетным образцам. Половина слоев, составляющие ½ сечения образца практически не дает вклада в электропроводность. Как следствие σ_{dc1} и σ_{dc1} в 2 раза ниже $\sigma_ф$.

Таблица 3

Значения электропроводности и коэффициент анизотропии электропроводности (К= $\sigma_{dc1}/\ \sigma_{dc\perp}$) для композитов с различной концентрацией технического углерода

С, % масс	v, % об	$\sigma_ф$	σ_{dc1}	σ_{dc2}	$\sigma_\perp$	К= $\sigma_{dc1}/\ \sigma_{dc\perp}$
45	27	$2{,}6\cdot10^{-1}$	$9{,}9\cdot10^{-2}$	$1{,}3\ 10^{-1}$	$6{,}0\cdot10^{-4}$	220
22,5	14	$4{,}56\cdot10^{-2}$	$2{,}11\cdot10^{-2}$	$2{,}18\cdot10^{-2}$	$4{,}35\cdot10^{-5}$	490
15	9,4	$1{,}29\cdot10^{-2}$	$6{,}44\cdot10^{-3}$	$6{,}23\cdot10^{-3}$	$3{,}73\cdot10^{-6}$	1 700
12	7,5	$4{,}7\cdot10^{-3}$	$2{,}35\cdot10^{-3}$	$2{,}22\cdot10^{-3}$	$7{,}3\cdot10^{-7}$	3 200
9	5,7	$1{,}3\cdot10^{-3}$	$6{,}5\cdot10^{-4}$	$7{,}5\cdot10^{-4}$	$5{,}1\cdot10^{-8}$	12 000
7,5	4,7	$3{,}07\cdot10^{-4}$	$1{,}94\cdot10^{-4}$	$1{,}72\cdot10^{-4}$	$6{,}8\cdot10^{-9}$	28 000
5,6	3,6	$5{,}22\cdot10^{-6}$	$3{,}21\cdot10^{-6}$	$2{,}91\cdot10^{-6}$	$7{,}7\cdot10^{-12}$	52 000

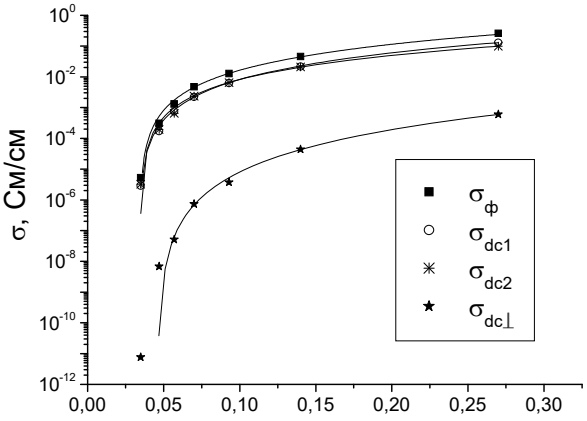


Рис. 1. Зависимости электропроводности на постоянном токе от объемной доли технического углерода для филаментов, а также образцов, напечатанных из этих филаментов

При измерении электропроводности перпендикулярно плоскости образца $\sigma_{dc\perp}$, ее величина практически полностью определяется переносом зарядов между соседними нитями. То, что $\sigma_{dc\perp}$ меньше $\sigma_ф$ или электропроводности единичного слоя вдоль направления укладки нити не вызывает удивления. Электропроводность сплошного, монолитного материала и должна быть выше, чем для случая, когда носителям зарядов требуется огибать поры и преодолевать границы между нитями. Неожиданным является величина этого различия – три порядка и более. Высокая анизотропия электропроводности вдоль и перпендикулярно плоскости слоёв делает исследуемые композиты неприемлемыми для ряда практических применений. Поэтому для расширения областей их применения необходимо разработать параметры печати, значительно снижающие анизотропию электропроводности.

Для образцов композиционных материалов с электропроводящим наполнителем, изготовленных традиционными способами, зависимость электропроводности (σ) от объемной концентрации наполнителя (v) для концентраций выше порога протекания (v_0) описывается следующим уравнением, выведенным в рамках теории протекания [5, 6]:

$$\sigma \sim \sigma_н\ (v - v_0)^t, \qquad (1)$$

где σ – электропроводность композита; $\sigma_н$ – электропроводность наполнителя; t – критический индекс электропроводности, введенный теорией протекания.

Концентрационные зависимости электропроводности, приведенные на рис. 1 были аппроксимированы зависимостью (1) для того, чтобы определить пороги протекания и критический индекс t. Результаты аппроксимации приведены в табл. 4.

Таблица 4

Порог протекания и критический индекс t, полученные аппроксимацией концентрационных зависимостей электропроводности, представленных на рис . 1 уравнением 1

σ	v_0	t
$\sigma_ф$	0,034	2,15
σ_{dc1}	0,033	2,18
σ_{dc2}	0,034	1,95
$\sigma_{dc\perp}$	0,046	3,03

Как следует из табл. 4, порог протекания для электропроводности вдоль слоев напечатанных образцов совпадает с порогом протекания для филамента, который можно считать монолитным образцом, изготовленным по традиционной технологии. Порог протекания в направлении, перпендикулярном слоям выше, что коррелирует с величинами электропроводности в этих направлениях. Критические индексы t для концентрационных зависимостей σ_{dc1} и σ_{dc2}, с учётом ошибки эксперимента, близки к 2, т.е. совпадают с величиной t=2, характерной для традиционных композитов с трёхмерной топологией бесконечного кластера. Таким образом, по электропроводности, порогу протекания и критическому индексу t напечатанные образцы близки к образцам, полученным традиционными методами. Следовательно, напечатанные изделия могут использоваться вместо изделий, полученных традиционными методами в тех случаях, когда ток в изделии течёт вдоль слоев.

Для концентрационной зависимости $\sigma_{dc}\perp$, критический индекс t равен 3, что существенно выше значения t=2, характерного для традиционных композитов с трёхмерной топологией бесконечного кластера. Причина этого нуждается в дальнейшем исследовании.

На рис. 2 приведены зависимости электропроводности $\sigma_{ac}\perp$ образцов с различной концентрацией сажи от частоты электрического поля. Как видно из рисунка, частотные зависимости электропроводности образцов, полученных по экструзионной аддитивной технологии, имеют классический вид для композитов с электропроводящим наполнителем [7, 8] и представляют собой сумму сквозной электропроводности, совпадающей с электропроводностью на постоянном токе (σ_{dc}) и релаксационной части (σ_{rel}).

$$\sigma_{ac}(f) = \sigma_{dc} + \sigma_{rel}(f) = \sigma_{dc} + f^{n}, \quad (2)$$

С увеличением концентрации сажи уровень σ_{dc} увеличивается, а угол наклона σ_{rel} в двойных логарифмических координатах уменьшается. Тангенс угла наклона релаксационной части для композита с пороговым значениям концентрации наполнителя представляет собой критический индекс x теории протекания, который наряду с критическим индексом t может дать информацию о структуре композита и механизмах переноса носителей зарядов. Из частотной зависимости электропроводности для композита с концентрацией сажи 4,7% об, наиболее близкой к порогу протекания, было получено, что для исследуемых композиционных материалов $\boldsymbol{x}$ = 0,74, что близко к теоретическому значению 0,72, полученному теорией протекания для случая трехмерных проводящих путей, имеющих структуру Шкловского – де Жена.

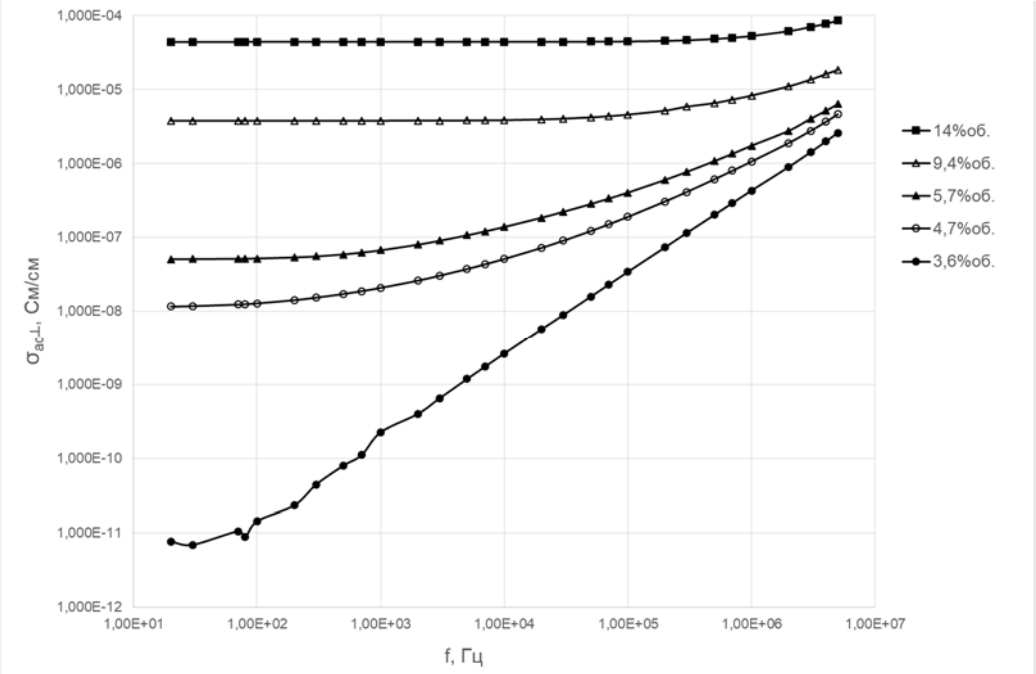


Рис. 2. Частотные зависимости электропроводности $\sigma_{ac}\perp$ для исследуемых образцов с различной объемной концентрацией технического углерода

Выводы:

1. Выполненные в данной работе исследования показали, что ряд электрических свойств образцов, изготовленных с использованием 3D-печати по технологии FFF, отличаются от свойств образцов, изготовленных традиционными методами.
2. Концентрационная зависимость электропроводности вдоль слоёв для напечатанных образцов имеет порог протекания ~3,4% об., совпадающий с порогом протекания для филаментов, из которых были изготовлены образцы. Критический индекс электропроводности t, с учётом ошибки эксперимента, близок к 2, т.е. совпадает с величиной t=2, характерной для традиционных композитов с трёхмерной топологией бесконечного кластера. Таким образом, напечатанные изделия могут использоваться вместо изделий, полученных традиционными методами в тех случаях, когда ток в изделии течёт вдоль слоев.
3. Электропроводность напечатанных образцов в направлении перпендикулярно плоскости слоёв имеет порог протекания значительно выше порога вдоль плоскости слоёв. Это свидетельствует о том, что перенос носителей зарядов между соседними нитями, существенно затруднён. Критический индекс t равен 3, что существенно выше индекса t=2, характерного для традиционных композитов с трёхмерной топологией бесконечного кластера. Причина этого нуждается в дальнейшем исследовании.

4. Зависимости электропроводности образцов, полученных по технологии FFF, от частоты электрического поля $\sigma_{ac\perp}(f)$ имеют классический вид для традиционных композитов с электропроводящим наполнителем. Для исследуемых композиционных материалов критический индекс x равен 0,74, что близко к теоретическому значению 0,72, полученному теорией протекания для случая трехмерных проводящих путей, имеющих структуру Шкловского – де Жена.

5. Для исследованных композитов наблюдается высокий коэффициент анизотропии электропроводности $K= \sigma_{dc1}/ \sigma_{dc\perp}$, причем К возрастает с уменьшением концентрации наполнителя от 220 до 5,2 10^4.

6. Высокая анизотропия электропроводности вдоль и перпендикулярно плоскости слоёв делает исследуемые композиты неприемлемыми для ряда практических применений. Поэтому для расширения областей их применения необходимо разработать параметры печати, значительно снижающие анизотропию электропроводности.

Научная работа выполняется в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (национальный проект «Наука и университеты», соглашение № 075-15-2023-116).

Программа «Приоритет 2030» реализуется в рамках федерального проекта «Интеграция» («Развитие интеграционных процессов в сфере науки, высшего образования и индустрии») национального проекта «Наука и университеты», реализуемого Минобрнауки России.

Список литературы

1. Глазырин А.Б., Абдуллин М.И., Басыров А.А., Колтаев Н.В., Кокшарова Ю.А. Электропроводящие материалы для 3D-печати // Вестник Башкирского университета. 2016. Т. 21. №1. С.81-85

2. Кондрашев С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А. Функциональные материалы, полученные способом FDM- печати // Труды ВИАМ. 2021. №3 (97). С.44-47.

3. Хаширов А.А. Влияние технологических режимов FDM-печати на свойства изделий из полифениленсульфона и его композита с дискретным углеродным волокном: дис. … к-та техн. наук. Нальчик, 2019. 124 с.

4. Контроль пористости формообразующего инструмента из СБС-пластика / А.С. Вивтоненко, Д.А. Таксимбаева, П.А. Петров, Н.С. Шмакова, И.А. Чмутин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 8. С. 680-686.

5. Stauffer D., Aharony A. Introduction to percolation theory. London: Taylor & Francis, 2nd edition, 1994. 195 p.

6. Sahimi M. Applications of percolation theory. London: Taylor & Francis, 1994. 276 p.

7. Torkunov M., Shiyanova K., Verkhova E., Yulovskaya V., Ryvkina N., Melnikov V., Gudkov M., Chmutin I. Powders of rGO-coated polyamide with special electrical properties for SLS 3D printing // Journal of Composite Materials. 2023. V. 57 (14). P. 2233–2242.

8. Chmutin I., Novokshonova L., Brevnov P., Yukhayeva G., Ryvkina N. Electrical properties of UHMWPE/ graphite nanoplates composites obtained by in-situ polymerization method // Polyolefins Journal. V. 4 (1). P. 1-12.

Кондратова Валерия Михайловна, лаборант, k.lera2000@mail.ru, Россия, Москва, МИРЭА — Российский технологический университет,

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент, petrov_p@mail.ru, Россия, Москва, Московский Политехнический Университет,

Рывкина Наталья Геннадьевна, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, ryv@mail.ru, Россия, Москва, МИРЭА — Российский технологический университет,

Чмутин Игорь Анатольевич, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, chmutin@mirea.ru, Россия, Москва, МИРЭА — Российский технологический университет,

Шмакова Наталья Сергеевна, канд. техн. наук, научный сотрудник, shmakova@technopark-slava.ru, Россия, Москва, МИРЭА — Российский технологический университет

FEATURES OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF PRODUCTS MADE USING 3D PRINTING BY FFF METHOD FROM A CARBON-FILLED POLYMER COMPOSITION

V.M. Kondratova, P.A. Petrov, N.G. Ryvkina, I.A. Chmutin, N.S. Shmakova

The paper investigates the electrical properties of samples made from a carbon-filled polymer composition using 3D printing by FFF (Fused Filament Fabrication). The technological parameters of the filament manufacturing process were selected in such a way that it had a smooth surface and its diameter did not change in length with an accuracy of ± 0.05 mm. It is shown that printed products can be used instead of products obtained by traditional methods in cases where current flows along the layers. To expand their application areas, it is necessary to select printing parameters that reduce the anisotropy of electrical conductivity.

Key words: composite material, polylactide, polyethylene, carbon black, electrical conductivity, 3D printing, FFF method.

Kondratova Valeria Mikhailovna, laborant, k.lera2000@mail.ru, Russia, Moscow, Russia, Moscow, MIREA — Russian University of Technology,

Petrov Pavel Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, petrov_p@mail.ru, Russia, Moscow, MIREA — Russian University of Technology,

Ryvkina Natalia Gennadievna, candidate of physical and mathematical sciences, researcher, ryv@mail.ru, Russia, Moscow, MIREA — Russian University of Technology?

Chmutin Igor Anatolyevich, candidate of physical and mathematical sciences, leading researcher, chmutin@mirea.ru, Russia, Moscow, MIREA — Russian University of Technology,

Shmakova Natalia Sergeevna, candidate of technical sciences, researcher, shmakova@technopark-slava.ru, Russia, Moscow, MIREA — Russian University of Technology

УДК 621.77.07: 691.175
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-693-694

ВЫБОР РЕЖИМА 3D-ПЕЧАТИ ФОРМООБРАЗУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СВОЙСТВ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.И. Чередниченко, П.А. Петров, Б.Ю. Сапрыкин

В работе рассмотрено применение аддитивных технологий для изготовления формообразующего инструмента из фотополимерного светоотверждаемого материала. Выполнено экспериментальное исследование реологических свойств 9 композиций фотополимерного материала, характеризующихся различным сочетанием физико-механических параметров. Установлено влияние скорости сдвига и температуры нагрева на значение динамической вязкости для исследованных композиций фотополимерных материалов. В завершении статьи приводятся рекомендации о применении полученных результатов для последующего выбора режима LCD-печати, учитывая расширение ресурса работы 3D-принтера, реализующего технологию «фотополимеризация в ванне».

Ключевые слова. формообразующий инструмент, фотополимер, ДСК-анализ тепловых свойств, 3D-печать, аддитивные технологии, динамическая вязкость, LCD-технология печати.

В аддитивном производстве выделилось направление – быстрое инструментальное производство [1] с применением аддитивных технологий. Быстрое инструментальное производство (rapid tooling) направленно на производство инструментов, инструментальных вставок, эталонов (калибров), штампов и пресс-форм [1]. Изготовление инструмента (оснастки) - один из самых дорогостоящих этапов подготовки производства. Компромисс между временем изготовления инструмента, его стоимостью, сроком службы и требуемой программой изготовления штампованных изделий позволяет применить аддитивные технологии и обеспечить экономический эффект.

Такой подход к изготовлению формообразующего инструмента требует обоснованного выбора аддитивной технологии и материала инструмента для обеспечения точности изготовления и требуемой партии штампованных изделий. В случае выполнения формообразующих операций с тонколистовым металлическим материалом, например, алюминиевыми сплавами толщиной до 0,3 мм, в качестве материала формообразующего инструмента может быть выбран светоотверждаемый фотополимерный материал. Инструмент из подобного материала изготавливается, например, по технологии LCD, которая является разновидностью аддитивной технологии «фотополимеризация в ванне» [9]. Для реализации LCD технологии применяется компактное настольное оборудование. Однако, ресурс такого оборудования не высок из-за не высокого ресурса работы компонентов: LCD-дисплей (матрица), пленка для резервуара, в котором хранится фотополимер при 3D-печати, плата управления.

Срок службы LCD-дисплея, являющимся источником света, составляет более 2000 часов, в отличие от DLP-источников света. Аддитивная технология «фотополимеризация в ванне» основана на засветке фотополимера, помещенного в резервуар, излучением определенной мощности и длины волны. При этом продолжительность засветки может меняться в зависимости от композиции фотополимера, сложности изготавливаемого изделия и износа источника света. Цель данной статьи проанализировать влияние физических, тепловых и реологических свойств фотополимеров на ресурс работы LCD-дисплея. Результаты анализа данного эффекта могут быть использованы для прогнозирования срока службы оборудования и, соответственно, расчета программы выпуска формообразующего инструмента.

Методика исследования. Определение тепловых свойств выполнено методом дифференциальной сканирующей калориметрией (ДСК) с применением прибора компании «Mettler Toledo» для образцов исходного фотополимерного материала, предназначенного для 3D-печати по аддитивной технологии LCD. По результатам испытания определена средняя температура стеклования, а также построена термограмма каждой из композиции исследуемых фотополимеров (смол). Режим проведения опыта по методу ДСК: нагрев в диапазоне 0 – 300 °С со скоростью 20К/мин в среде N_2.

На рисунке 1 показаны термограммы исследуемых материалов, полученные методом ДСК. Диапазон исследуемых температур – от -120,0 °С до 100 °С. На рис. 1 стрелками показано направление экзотермического («экзо»; выделение тепла) и эндотермического («эндо»; поглощение тепла) эффекта. Характерным переходом, определяющим первый эффект, является кристаллизация. Характерными переходами, определяющими второй эффект, являются: 1) плавление; 2) переходы жидкая- кристаллическая фазы; 3) испарение; 4) переход стеклования. Диапазон температур, в котором наблюдается переход стеклования, составляет от -80,0 °С до -40,0 °С. Для смолы 8 при температуре 80,0-90,0 °С наблюдается пик кристаллизации. Для смол 1-7 и 9 в диапазоне температуры от 60,0 до 100,0 °С проявляется слабый пик плавления. Средняя температура стеклования исследуемых материалов приведены в табл. 1. Для каждой композиции имеется параметр вязкость, заданный производителем фотополимерной композиции.

Таблица 1

Характеристики материалов образцов

Фотополимер	Плотность, г/см^3	Средняя температура стеклования, °С
образец 1	не определено	-80,59
образец 2	1,1/1,184	-65,82
образец 3	1,05-1,25	-63,8
образец 4	1,10	-56,06
образец 5	1,05-1,25/1,05-1,25	-72,79
образец 6	1,1-1,2	-65,72
образец 7	1,2 ± 0,1	-54,63
образец 8	не определено	-70,13
образец 9	1,05	-73,55

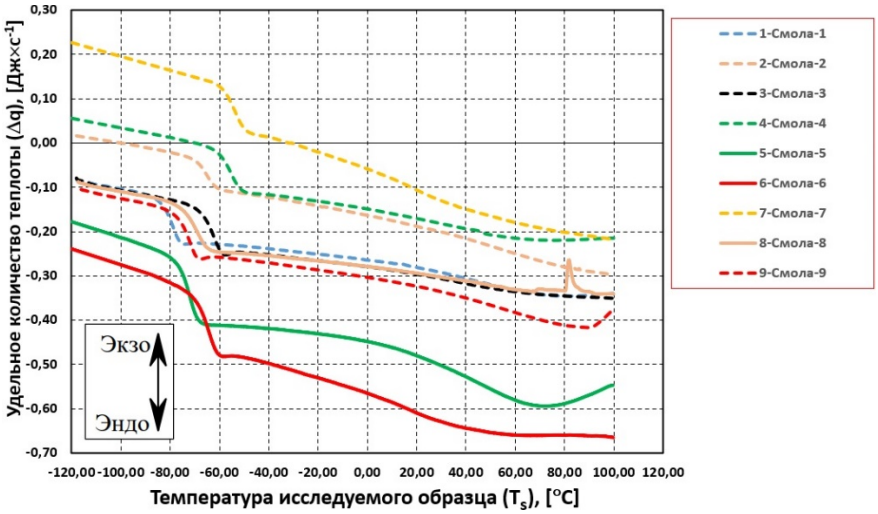


Рис. 1. ДСК-диаграммы для образцов № 1-9 фотополимеров (смол)

В таблицах 2 и 3 представлены значения механических, тепловых и физических характеристик фотополимерных композиций. Указанные значения приводятся производителями образцов исследуемых материалов в технической спецификации на сайте либо в паспорте материала (Material Safety Data Sheet). Анализ собранных данных показывает, что есть характеристики, которые практически не отражены в спецификации, например усадка материала и температура термической деформации. Первый параметр важен для проектирования изделия, планируемого к изготовлению по аддитивной технологии «фотополимеризация в ванне». Второй параметр относится к эксплуатационным характеристикам изделия, изготовленного из фотополимерного материала.

Таблица 2

Механические и тепловые свойства образцов исследуемых композиций

Фотополимер	Твердость по Шору	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Усадка, %	Температура термической деформации, °С
образец 1	60-75A	7,9	255,1	не определено*	не определено*
образец 2	82-84D	36,0-45,0	11,0-20,0	3,72-4,24	50,0
образец 3	75-80D	29,0-34,0	не определено*	4,0-5,0	50,0
образец 4	75D	62,7	6,0	3,3	не определено*
образец 5	78-86D	22,89±10%	14.91±10%	3,72-4,24	не определено*
образец 6	80-90D	не определено*	7,5-11,0	менее 1,0	не определено*
образец 7	96,0D ± 3	70,0 ± 5,0	4,1 ± 1,1	менее 0,5	не определено*
образец 8	74-78D	23,0	25,4	не определено*	не определено*
образец 9	43D	13,0	212,0	0,9	180

Таблица 3

Физические свойства исследуемых образцов

Фотополимер	Плотность (в жидком состоянии либо в твердом состоянии) г/см^3	Вязкость (динамическая) при температуре 25 °С, мПа×с	Длина волн излучения для отверждения, нм
образец 1	0,95-1,06	1250,0	385-405
образец 2	1,05-1,25	150-200,0 (до 280,0)	405
образец 3	1,18	450,0-600,0	390-410
образец 4	1,10	120,0-140,0	405
образец 5	1,05-1,25	100,0-350,0	405
образец 6	1,1-1,2	200,0	385-405
образец 7	1,2 ± 0,1	600-1200	405
образец 8	0,95-1,06	618,0	385-405
образец 9	1,05	667,0	385-410

Примечание: * - отсутствуют значения характеристики в паспорте фотополимера – Material Safety Data Sheet.

Исследуемые фотополимеры можно разделить на две группы по твердости, измеряемой по Шору: шкала A и шкала D (см. таблицу 2). В большинстве своем фотополимеры относятся к одной группе по критерию «твердость по Шору». Только «образец 1» имеет значение твердости, определяемое по шкале A – данный материал характеризуется достаточно высокой динамической вязкостью (см. таблица 2).

Все образцы исследуемых фотополимеров светоотверждаемы в диапазоне длины волны от 385 до 410 нм, что соответствует требованиям технологии LCD. Значение динамической вязкости определяется производителями по стандартной методике, описываемой в стандартах (ASTM D 2983, IP 267, ISO 9262, ГОСТ 1929, EN 13302, ПНСТ 6-2012), при температуре 23-25 °C. Для выбора рационального режима 3D-печати по технологии LCD, в соответствии с целью данной работы, рассмотрим взаимосвязь динамической вязкости фотополимера и температуры его нагрева.

Реологические свойства образцов исходных светоотверждаемых фотополимерных материалов исследовались методом ротационной реометрии. Исследование проведено в режиме сдвигового деформирования с применением реометра «Physica MCR301» («Anton Paar»; компания «Аврора», г. Москва). Рабочий узел конус-плоскость с диаметром конуса 50 мм (угол между образующей конуса и плоскостью 1°). Испытания проводили в условиях стационарного течения по двум режимам:

1) в режиме контролируемой скорости сдвига при постоянной температуре 25°C;

2) в режиме сканирования по температуре в диапазоне 25–95°C (скорость нагрева 2 град/мин, скорость сдвига 5 c^{-1}).

На рисунке 2 представлена для различных композиций исследуемых фотополимеров (см. таблицу 1) зависимость динамической вязкости от скорости сдвига при температуре 25°C; в таблице 4 – значения сдвиговой вязкости для образцов различных фотополимерных композиций.

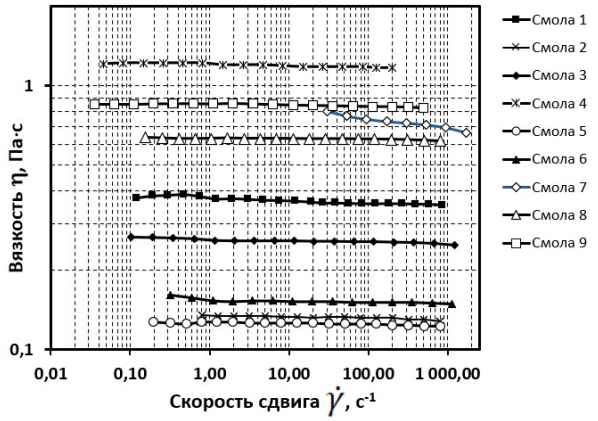


Рис. 2. Зависимость динамической вязкости фотополимера (смолы) для 3D-печати от скорости сдвига при T=25°C

Таблица 4

Значения динамической вязкости исследуемых образцов при T=25°C и скорости сдвига 5 c^{-1} (измерения проведены в исходном не отвержденном состоянии фотополимеров; скорость сдвига постоянная)

Фотополимер	Вязкость (динамическая), мПа×с
смола 1	1200,0
смола 2	134,0
смола 3	369,0
смола 4	258,0
смола 5	126,0
смола 6	153,0
смола 7	745,0 (при 100 c^{-1})
смола 8	630,0
смола 9	854,0

Значение динамической вязкости на рисунке 2 и на рисунке 3 показаны в логарифмической шкале. Образцы 1-6, 8 и 9 проявляют поведение, характерное для ньютоновских жидкостей – практически линейная зависимость вязкости от скорости сдвига. Вязкость остаётся постоянной в широкой области приложенных сдвиговых скоростей. Образец 7 в области низких скоростей сдвига демонстрируют неньютоновское поведение, характерное для дисперсий. Зафиксирован предел текучести в области напряжений 5…10 Па (при 25°C).

Как было изучено ранее [10], скорость 3D-печати фотополимерного материала напрямую зависит от его вязкости. Так, вещество с наименьшей вязкостью из изучаемых (126,0 мПа×с) требует для полимеризации засветки в течение 2,3 с; образец фотополимера с наибольшей вязкостью (1200,0 мПа×с) полимеризуется при воздействии на него излучением с длиной волны 405нм в течение 10 с; образец №7 полимеризуется за 3,8 с. В зависимости от вязкости фотополимера могут быть подобраны различные режимы 3D-печати таким образом, чтобы минимизировать износ оборудования – LCD- дисплея.

При печати образцом смолы №5 (толщиной слоя 50 мкм), для изготовления детали высотой 165 мм (максимальная рабочая зона принтера «Anycubic Photon mono», на котором проводились испытания) потребуется работа LCD-дисплея в течение 7590 секунд, или 126,5 мин (чуть более 2 часов).

Для создания аналогичной модели из образца смолы №1 потребуется 33000 секунд работы LCD-дисплея или 550 мин, что соответствует 9 часам 10 минутам. Ресурс LCD-дисплея выработается для каждого фотополимера

спустя различное время. Так, при печати образцом смолы №5 3D-принтер позволит изготовить более 1000 объектов (максимальной высотой 165 мм) до выхода из строя; при печати образцом смолы №1 – 222 объекта.

Для увеличения срока службы LCD-дисплея при использовании фотополимерных материалов аналогичных образцу смолы №1 необходимо уменьшать вязкость применяемых материала. Помимо зависимости от скорости сдвига, динамическая вязкость исследуемых образцов зависит от температуры материала (рисунок 3). Наблюдается уменьшение вязкости с ростом температуры нагрева. Как следует из графиков на рисунке 3 температурная зависимость носит нелинейный характер.

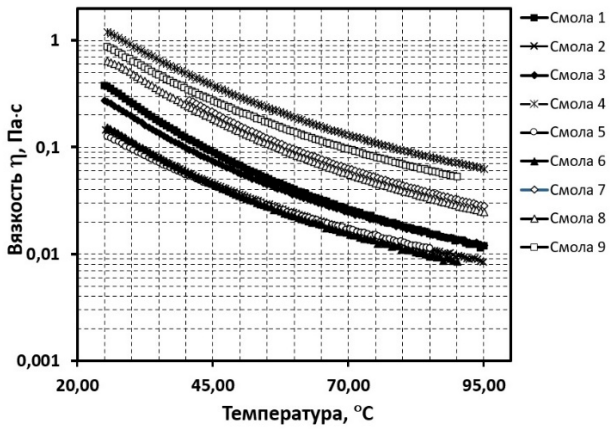


Рис. 3.Температурная зависимость динамической вязкости образцов: постоянная скорость сдвига 5 $с^{-1}$ (образец 1-6, 8, 9) и 100 $с^{-1}$ (образец 7)

Значение динамической вязкости образца смолы №1 при его нагреве до 40°С снижается до значения вязкости образца смолы №5 при температуре 25°С. Отсюда следует, что при нагреве рабочей области 3D-принтера можно полимеризовать светоотверждаемый материал, характеризуемый высокой динамической вязкостью при температуре 25°С, в 4-5 раз быстрее. Следовательно, ресурс работы устройства (LCD-дисплея), необходимого для излучения света (УФ-излучения), окажется выше. Однако, есть неочевидное ограничение – при нагреве светоотверждаемого фотополимера выше 60°С материал осуществляет переход к стеклообразному состоянию (происходит деформация структуры вещества).

Выводы и заключение. Проведенное исследование и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1) физико-механические и реологические свойства каждый светоотверждаемый фотополимер для LCD технологии 3D-печати имеют диапазон допустимых значений (см. таблицу 1-3);

2) при производстве значения свойств каждой композиции фотополимера характеризуются определенными значениями (см. таблица 4), например, динамическая вязкость имеет абсолютное значение сопоставимое с допустимым диапазоном значений;

3) ресурс работы отдельных компонент LCD 3D-принтера может быть увеличен за счет управления реологическими свойствами фотополимера при его 3D-печати – изменение температуры смолы в процессе обработки;

4) в полученных результатах (см. рисунки 2 и 3) проявляется зависимость динамической вязкости фотополимера не только от скорости сдвига, но также и от температуры обрабатываемого материала, так, например, смола №1 при температуре нагрева 40°С или смола №7 при температуре 53-55°С ведет себя практически также, как смола №5 при температуре 25°С;

5) полученные зависимости динамической вязкости от температуры могут быть рекомендованы для выбора температуры нагрева рабочей области 3D-печати по LCD-технологии при изготовлении формообразующего инструмента из светоотверждаемых фотополимерных композиций со значением динамической вязкости более 500 мПа×с; смолы подобные образцу №7 или №8 характеризуются не только высоким значением вязкости при температуре 25°С (см. таблицу 3), но и значением твердости – более 70D по шкале Шора.

Список литературы

1. A. Gebhardt, J.-S. Hötter. Rapid Tooling. In: Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016 – pp. 353-394 https://doi.org/10.3139/9781569905838.

2. T. Himmer, T. Nakagawa, N. Mohri: “Rapid Die Manufacturing System”, Proceedings of the 7th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, 1998.

3. T. Himmer, A. Techel, S. Nowotny, E. Beyer. Recent developments in metal laminated tooling by multiple laser processing. // Rapid Prototyping Journal, 2003, Vol. 9 Issue: 1, pp.24-29.

4. Петров П.А., Бурлаков И.А., Сапрыкин Б.Ю. Аддитивные технологии в металлообработке // Кузнец - всем ремеслам отец. сборник материалов I Международной научно-практической конференции (в рамках Международного кузнечного фестиваля «Секреты средневековых кузнецов»). М., 2023. С. 34-44.

5. 27. Gajdoš I.; Maňková I.;Jachowicz T. and Tor-Swiatek A.: Application of Rapid Tooling approach in process of thermoforming mold production. Paper 32 Proceedings of 8th International Engineering Symposium at Bánki [PDF] (ISBN: 978-615-5460-95-1), 2016,

6. L B Aksenov and I Y Kononov 3D Printed Plastic Tool for Al Thin-Sheet Forming. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 337 (2019) 012053. doi:10.1088/1755-1315/337/1/012053.

7. Nader Asnafi, Jukka Rajalampi, David Aspenbergю Design and Validation of 3D-Printed Tools for Stamping of DP600. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 651 (2019) 012010, doi:10.1088/1757-899X/651/1/012010.

8. Günther Schuh, Georg Bergweiler, Philipp Bickendorf, Falko Fiedler, Can Colag. Sheet Metal Forming Using Additively Manufactured Polymer Tools. Procedia CIRP 93 (2020) 20–25.

9. ГОСТ Р 57589-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования.

10. Чередниченко Н.И., Петров П.А. Определение зависимости параметров трехмерной печати от композиции фотополимерного материала. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2022. Т. 9. № 1. С. 3-8.

Чередниченко Наталья Ивановна, магистрант, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Петров Павел Александрович, канд. техн. наук, доцент, petrov_p@mail.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Сапрыкин Борис Юрьевич, старший преподаватель, saprykin-boris@mail.ru, Россия, Москва, Московский политехнический университет

SELECTION OF THE 3D-PRINTING MODE OF A FORMING TOOL BASED ON THE ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF PHOTOPOLYMER MATERIALS

N.I. Cherednichenko, P.A. Petrov, B.Yu. Saprykin

The paper discusses the use of additive technologies for the manufacture of shaping tools from photopolymer light-curing material. An experimental study of the rheological properties of 9 compositions of photopolymer material, characterized by different combinations of physical and mechanical parameters, was carried out. The influence of shear rate and heating temperature on the value of dynamic viscosity for the studied compositions of photopolymer materials has been established. At the end of the article, recommendations are given on the use of the obtained results for the subsequent selection of the LCD printing mode, taking into account the expansion of the operating life of a 3D printer that implements the "photopolymerization in a bath" technology.

Key words: forming tool, photopolymer, DSC-analysis of heat properties of photopolymer, 3D-printing, additive technologies, VAT photopolymerization, dynamic viscosity, LCD-printing technology.

Cherednichenko Natalia Ivanovna, Undergraduate, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Petrov Pavel Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, petrov_p@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Saprykin Boris Yuryevich, senior lecturer, saprykin-boris@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

УДК 621.833
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-697-698

АНАЛИЗ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ АВИАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.П. Пястолов, Д.И. Сагитов

Рассмотрены различные классификации исследования работоспособности электрических систем воздушных судов, изложено введение в устройство элементов бортового радиоэлектронного оборудования с использованием схем, представлены локальные центры управления нагрузками на самолёте.

Ключевые слова: авиационная индустрия, системы авиационного оборудования, система электроснабжения самолёта, системы модулей питания.

Современное развитие авиационной индустрии характеризуется усилением технической сложности бортового авиационного оборудования, эксплуатации, а также внедрением передовых интеллектуальных систем электроснабжения в новых видах воздушных судов, в том числе в беспилотных летательных аппаратах. Научные исследования также направлены на создание полностью электрических летательных аппаратов. Однако это сопровождается повышенной вероятностью сбоев в полете, обусловленной увеличением нагрузки на систему электроснабжения.

Несмотря на это, необходимо обеспечивать высокий уровень безопасности полетов, регулярность перевозок и экономическую эффективность. Настоящее исследование направлено на создание визуальной картины сложности исследования поломок в системах электроснабжения самолёта.

Построение системы контроля в авиационном оборудовании может зависеть от нескольких факторов. Во-первых, в своем составе она должна иметь встроенные средства самодиагностики. Во-вторых, для разработки такой системы требуется задача дополнительных алгоритмов проверки авиационного оборудования до включения его в работу. Исходя из этого, следует отметить, что обеспечение авиационного оборудования дополнительными средствами встроенного и расширенного контроля выполняется изготовителем на этапе проектирования данного оборудования с учетом включения новых функций в аппаратно-программный комплекс.

Исследования в области технической диагностики авиационного оборудования. Термин «Система авиационного оборудования» обозначает комплексные программно-аппаратные средства, где информация передается через преобразование энергии. В процессе диагностики авиационного оборудования осуществляется обработка и передача информации, полученной измерительными системами (аналоговыми и/или цифровыми). В работах К. Шенона (1948 г.) и Р. Хартли (1928 г.) рассматривались вопросы вероятностных моделей для событий с разными и одинаковыми вероятностями соответственно. Работы В. А. Котельникова затрагивают вопросы квантования электрических сигналов.

Прогресс в этой сфере тесно связан с ускоренным развитием технических средств связи. Поскольку объем информации растет, важен ее ценностный аспект. Оценка состояния объекта требует анализа информации, получаемой системой контроля. Для диагностики технического состояния объекта выбираются наиболее значимые параметры, один или их комбинация, которые точно определяют его состояние.

Кроме анализа состояния объекта, важно изучать диагностические признаки. Развитие диагностики стремится к расширению возможностей контроля, обеспечивая более быстрые и точные методы выявления причин отклонений. Важно учитывать конструктивные особенности средств диагностики.

Согласно ГОСТ 20911-89, техническая диагностика охватывает теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. Теоретические исследования в этой области представлены в научных трудах различных авторов, описывающих процессы диагностики, методы анализа диагностических моделей и способы контроля работоспособности.

Эффективность эксплуатации зависит от эффективности диагностирования. Для этого требуется наблюдение, обработка информации с учетом режимов работы и определение временных интервалов контроля. Для обеспечения эффективного технического обслуживания авиационного оборудования необходима ранняя диагностика. Этот вид мониторинга позволяет выявлять неисправности на ранних стадиях, что позволяет принимать решения о замене оборудования заблаговременно. Раннее обнаружение неисправностей способствует предотвращению отказов в процессе эксплуатации, повышая надежность авиационного оборудования.

О. Ф. Машошин воспользовался классификацией методов диагностики по Биргеру И. А. (рис. 1), использование которой позволяет определить наиболее подходящее направление исследований.

Рис. 1. Классификация методов диагностики по Биргеру И.А.

Сегодня гражданская авиация России находится на этапе полного импортозамещения авиационного оборудования, включая ключевые компоненты электропитания. Это подчеркивает необходимость оперативной и точной оценки состояния оборудования для увеличения его ресурса. Надежность элементов в системах распределения электроэнергии становится фактором, влияющим на безопасность использования воздушных судов.

На данный момент имеются проверенные и обоснованные методы диагностики, которые позволяют проводить исследования без прямого подключения к внешним сетям. В авиаремонтных предприятиях активно разрабатываются специальные программы для стендовых испытаний, нацеленные на проверку электротехнических устройств и компонентов. Эти методы внедряются при регулярном техническом обслуживании воздушных судов.

Определение подходящего метода диагностирования требует учета нескольких критериев:

Оперативность и точность передачи информации.

Влияние отказов измерительных каналов и задержек при передаче информации.

Присутствие переходных процессов, параметров возмущений как детерминированного, так и стохастического характера.

Разработчики авиационного оборудования обязаны создавать точные критерии для определения состояния изделия в любой момент времени, что позволяет оценить его работоспособность и ресурс. Перечень параметров определяет способность выполнения функций и квалифицирует изделие как "работоспособное", "частично работоспособное" или "неработоспособное".

Применение методов диагностики в авиационном оборудовании крайне важно для поддержания высокого уровня отказоустойчивости воздушной техники. Эти системы помогают предотвратить отказы в различных системах на борту самолета (СЭС, СКВ, ГС), определить готовность оборудования к дальнейшей эксплуатации, а также определить объемы и сроки необходимых ремонтных работ.

Анализ зарубежного опыта диагностирования электрооборудования подтверждает, что выявление причин неисправностей в различных компонентах системы изучено в деталях. В работах иностранных авторов представлено логическое описание процедуры поиска неисправностей в любой аппаратуре:

a. Выявление признаков неисправности;
b. Углубленный анализ этих признаков;
c. Составление возможных неисправных функциональных узлов;
d. Локализация неисправного функционального узла;
e. Определение места неисправности в схеме;
f. Анализ отказов компонентов.

Анализ построения питающих цепей авиационного оборудования. Приёмник электрической энергии – это техническое устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии в другие формы энергии (или в электрическую энергию с определенными параметрами). По функциональному назначению приёмники электрической энергии могут быть радиоэлектронным оборудованием и электрооборудованием, такими как электроприводы, нагревательное и осветительное оборудование. Комплектация летательных аппаратов включает большое число приёмников электрической энергии.

Приёмники электрической энергии можно классифицировать по следующим признакам:
по функциональному назначению;
по электротехническим и энергетическим характеристикам;
по режиму работы;
по требованиям к надежности электроснабжения;
по типу защиты от воздействия внешних факторов.
Классификация приёмников электрической энергии по надежности:
приёмники, необходимые для безопасного завершения полета и посадки;
приёмники, используемые для безопасного продолжения полета, выполнения задачи и посадки;
приёмники, отказ которых не влияет на безопасность полета.

Время работы СЭС в аварийном режиме при питании приемников электроэнергии первой категории от аккумуляторной батареи составляет не менее 30 мин.

Для обеспечения электропитанием приемников электроэнергии первой категории необходимо устанавливать аварийные (альтернативные) источники, которые являются независимыми от основной системы генерирования. Такие источники должны длительное время обеспечивать приемники первой категории электропитанием во время полета.

В состав приемников, на которые должно подаваться электропитание от аварийных источников, должны входить:

приемники, функционирование которых необходимо для обеспечения безопасности и которые должны продолжать работать автоматически после отказа основной системы генерирования;
приемники, которые необходимы для продолжения управляемого полета;
приемники, которые требуются для снижения высоты, захода на посадку и посадки.

Из-за разнообразия приемников к каждому из них должна быть встроена система контроля, работоспособность которой подтверждается при работе приемника при заданной нагрузке тока. Бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) современных и перспективных воздушных судов, например, Ил-114-300, МС-21, SSJ-100, включает в себя встроенные источники вторичного электропитания (ВИП). Основное предназначение ВИП заключается в обеспечении напряжения для питания электрической энергией электронных и других устройств. При этом ВИП получает энергию от первичных источников электроэнергии, которые производят электричество с помощью генераторов и аккумуляторов. ВИП являются преобразователями электрической энергии.

В большинстве случаев ВИП преобразует энергию переменного и/или постоянного тока электрической сети в электроэнергию постоянного напряжения требуемого уровня.

ВИП выполняет следующие задачи:
обеспечение передачи мощности с наименьшими потерями и соблюдением заданных характеристик;
преобразование вида электроэнергии (преобразование переменного напряжения в постоянное, и наоборот, преобразование частоты, формирование импульсов напряжения и т. д.);
преобразование уровня напряжения;
стабилизация параметров (напряжения, тока и других параметры на выходе источника питания в зависимости от его назначения) при влиянии всей совокупности дестабилизирующих факторов;
защита в случае возникновения неисправности (коротких замыканий, обрывов и др.);
гальваническая развязка цепей;
регулировка и настройка для обеспечения правильной работы электроприбора в соответствии заданными требованиями;
управление (регулировка, включение/отключение каких-либо цепей, или источника питания в целом);
контроль (отображение или индикация параметров на входе и на выходе источника питания, включения/выключения цепей, срабатывания защит), который может быть встроенным или дистанционным.

Модули вторичных питающих напряжений, входящие в блоки, имеют в своем составе схему допускового контроля выходных напряжений, формирующую сигнал исправности модуля. Сигналы исправности блоков используются в комплексе БРЭО для обеспечения его отказоустойчивости путем резервирования на уровне блоков и систем. Все модули вторичных питающих напряжений, предназначенные для питания блоков, содержащих в своем составе вычислительные модули, вырабатывают и выдают в вычислительные модули сигнал аварии сети питания (АСП). Сигнал АСП вырабатывается в том случае, когда входное напряжение, поступающее на блок от системы электроснабжения, и напряжение аварийного источника снижаются до величин, соответствующих аварийному режиму. Модули вторичных питающих напряжений и системы вторичного электропитания блоков выполняются по одноуровневой (рис. 2), двухуровневой (рис. 3) и трехуровневой схемам (рис. 4).

В трехуровневой схеме на вход модуля вторичных питающих напряжений поступает напряжение от системы электроснабжения переменного тока U = 115 В, f = 400 Гц и напряжение от аварийного источника U = 27 В. Эти модули применяются для питания БЦВМ.

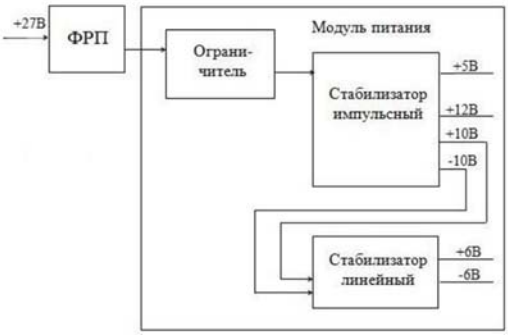


Рис. 2. Одноуровневый стабилизатор

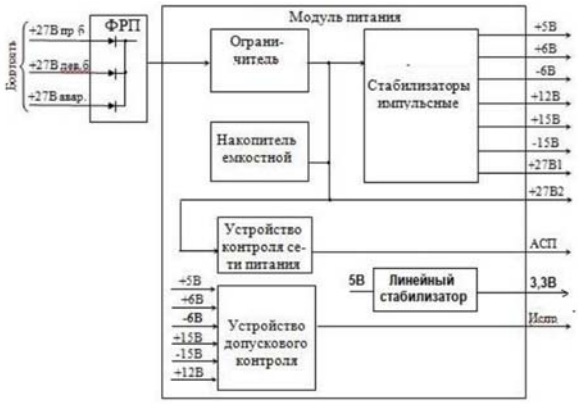


Рис. 3. Двухуровневая схема питания

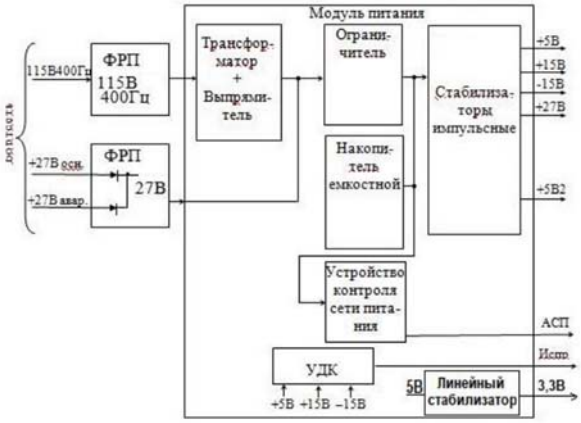


Рис. 4. Трехуровневая схема питания

В составе каждого из вышеуказанных блоков входит фильтр радиопомех (ФРП).

Данный фильтр служит для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) аппаратуры комплекса БРЭО. В развивающейся концепции интегральной модульной авионики аппаратура БРЭО должна быть выполнена в виде стандартных стеллажей (крейтов) с установленными в них унифицированными функциональными модулями. Каждый крейт включает в свой состав ИВЭП и ФРП. Питание источников вторичного электропитания крейтов обеспечивают от двух каналов первичной системы электроснабжения и от аварийного источника электропитания, что существенно увеличивает сложность источников и требует установки дополнительных фильтров радиопомех. Структура электропитания крейта показана на рисунке 5

Приемники электрической энергии можно разделить по виду электрической энергии необходимой для их работы и по структуре их входных цепей, подключаемых к источнику питания. Анализ БРЭО современных воздушных судов показывает, что их входные цепи имеют структуру, представленную на рисунке 6 и 7.

Из анализа видно, что современные БРЭО оснащены импульсными блоками питания и входными фильтрами для обеспечения электромагнитной совместимости с ВС. Мощные приемники электроэнергии включают нагревательное оборудование и электродвигатели приводов. Контроль нагревательных элементов может быть осуществлен путем измерения их сопротивлений. Управляемые электродвигатели используют полупроводниковый преобразователь электроэнергии, тогда как неуправляемые приводы подключаются непосредственно к источнику. Современные самолеты, такие как А380, А350, МС-21 используют управляемые электродвигатели, а концепция полностью электрического самолета предусматривает еще большее применение управляемых электрических приводов для различных функций.

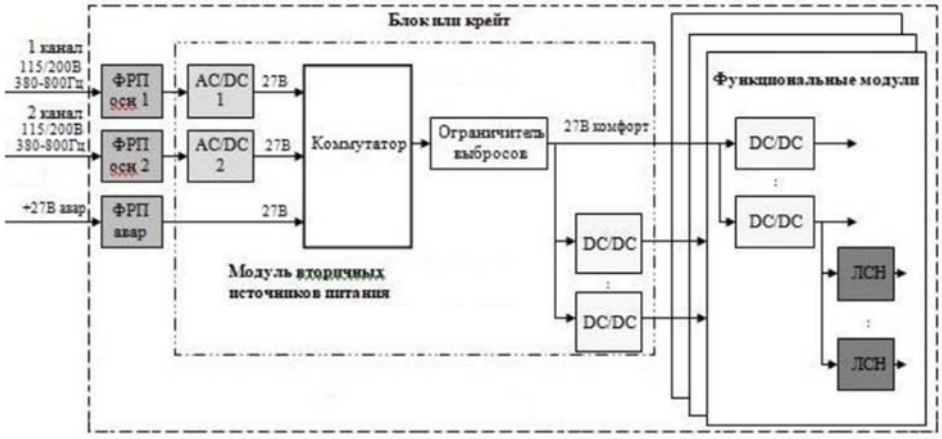


Рис. 5. Схема питания крейта

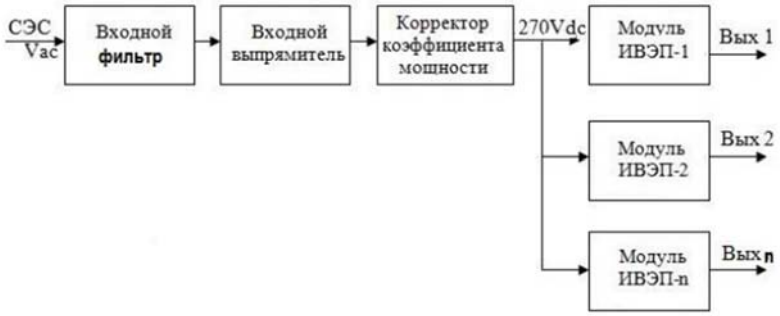


Рис. 6. Организация цепей питания БРЭО электроэнергией переменного тока

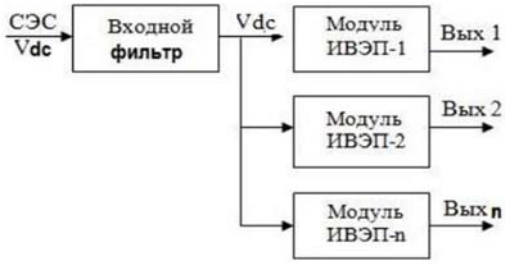


Рис. 7. Организация цепей питания БРЭО от источников постоянного тока

Возможности диагностирования и прогнозирования состояния потребителей электроэнергии в процессе эксплуатации воздушных судов. Если перейти от термина «диагностирование» к термину «прогнозирование», то конечной целю прогнозирования ТС будет являться определение с заданной вероятностью интервала времени, в течение которого сохранится исправное состояние объекта исследования. Также можно спрогнозировать вероятность сохранения исправного состояния в конкретный период времени.

Встроенным средствам контроля присущи следующие основные преимущества:

• значительное сокращение времени восстановления работоспособности системы и, соответственно, повышение общей эксплуатационной готовности;

• уменьшение численности обслуживающего персонала, обеспечивающего ремонтно-восстановительные работы;

• сокращение видов ремонта и запасных частей за счет повышения достоверности контроля. В настоящее время существенно повысилось качество надежности применяемой электроники на ВС. На это повлияло применение микропроцессорных технологий в составе системы распределения ВС. Это повлекло за собой снижение потребляемой мощности, снижение массы электронных компонентов, а значит и самого ВС в целом, и расширение функционала. Создание микропроцессорных технологий повлекло за собой реализацию новых стратегий ТоиР (техническое обслуживание и ремонт), которые уменьшают время восстановления и сокращают число ложных замен и отказов, выявленных авиационным персоналом.

Формируя распределенную систему контроля на борту ВС, целесообразно реализовывать оценку технического состояния оборудования в узлах сосредоточения нагрузок. Локальные центры управления нагрузками (ЛЦУН) и распределительные центры (РЦ) могут являться такими узловыми точками в системе распределения ВС. Локальные центры управления нагрузками являются составной частью системы распределения электрической энергии современного ВС. Помимо ЛЦУН в эту систему входят также первичный и вторичный центры распределения. Для самолетов с геометрией подобной Boeing 787, A380 (размещение силовых установок на крыле, строение фьюзеляж) первичные и вторичные распределительные центры размещаются в центроплане и вблизи пилотской кабины (рис. 8), что обеспечивает минимальную длину силовых проводников.

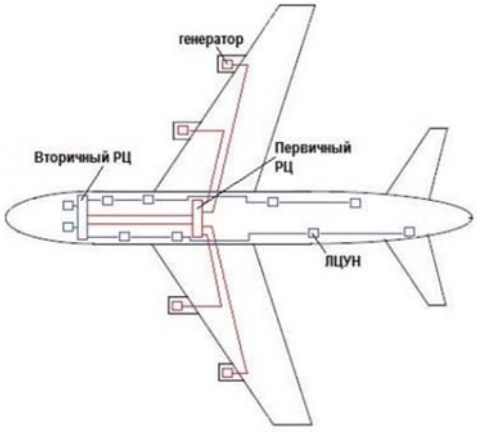


Рис. 8. Размещение системы распределения

Возможности этой аппаратуры не ограничены. ЛЦУН помимо обеспечения коммутацией электрических сетей и нагрузок может обеспечивать функции контроля токов и напряжений и оценку состояния оборудования, поскольку полностью сопрягается с цифровой шиной управления.

Терминология в России: локальные центры управления нагрузкой (ЛЦУН), выключатель-предохранитель (ВП), блок коммутации и защиты (БКЗ), интеллектуальный силовой коммутатор (ИСК). Архитектуру построения ЛЦУН можно рассмотреть на примере SPDU SERIES 28 (рис. 9).

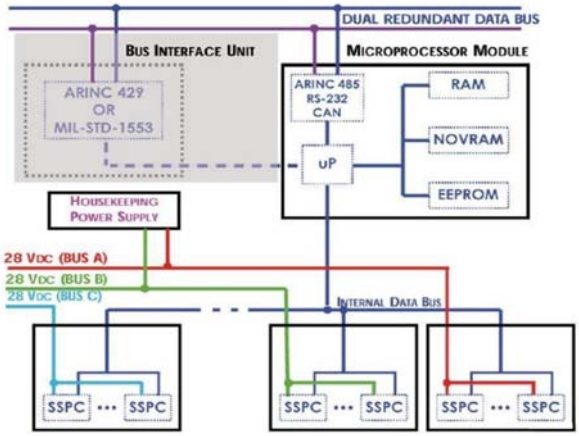


Рис. 9. Архитектура SPDU 28

Данный SPDU в штатной комплектации содержит 28 электронных ключей (SSPCs), предназначенных для коммутации напряжения 28В постоянного тока. Блок содержит 6 каналов на ток до 10А (при t≤85С) и 22 канала на ток до 5А (при t≤85С), кроме того, есть модификации с двумя дополнительными каналами по 60 А. Блок имеет дублированную шину питания 28 В и дублированную шину обмена данными, встроенный источник питания для системы управления. Блок содержит 7 сменных плат (LRM). Управление блоком осуществляется по шине данных, с помощью дискретных сигналов или кнопок на корпусе, на корпус также выведена светодиодная индикация состояния ключей. SPDU имеет развитую встроенную систему контроля: в момент включения, в процессе функционирования и контроль по требованию. В процессе контроля проверяется ампер-секундная характеристика ключей. Каналы могут программироваться на токи 75%, 50%, 25% от их номинального значения. По шине данных также передается состояние ключей, токи нагрузок, состояние блока. В следствии наличия прямой электрической связи ЛЦУН с электрическим оборудованием можно реализовать в составе ЛЦУН дополнительно функции контроля для внешнего оборудования. ЛЦУН обеспечивает контроль токов и напряжений в системе распределения ВС, также в его состав входит управляющий процессор и к нему подключены шины для передачи данных.

Анализ свойств и причин выхода из строя реактивных элементов. Состояние и надежность элементов различных систем (например, элементов электрических схем), исходя из их физических процессов полностью зависит от свойств конкретных материалов, из которых они изготовлены, от характера внешних воздействий и факторов нагрузки. Для основных материалов, используемых в авиационной промышленности, имеются зависимости протекания физико-химических процессов. Эти зависимости строятся на основе старения и изменения механических, электрических и магнитных свойств материалов, а также на основе количественных показателей воздействующих факторов. В первую очередь старение материалов обусловлено рекристаллизацией материалов, химическими реакциями, диффузией, коррозионными процессами и увлажнением. Из-за перечисленных явлений происходит изменение исходных свойств материалов, из которых изготовлены конкретные элементы. За этими изменениями свойств материалов следуют повреждения элементов и в дальнейшем возникновение отказов системы, в состав которой входил этот элемент. Чтобы понять, насколько изменились характеристики оборудования следует проанализировать начальные свойства данного оборудования, напряженное состояние материала и интенсивность воздействия внешних факторов. Как правило, элементы электрических схем часто выходят из строя в следствии длительного нагрева или ошибок при эксплуатации.

Рассмотрим на конкретном примере выход из строя конденсаторов. Электролитические конденсаторы приходят в негодность из-за высыхания электролита в течение некоторого промежутка времени. Обычно, это очень сложно проконтролировать ввиду того, что нет никаких внешних признаков дефекта. Не существует типов схем, которые более или менее подвержены этой неисправности. Подобного рода снижение емкости, можно наблюдать, как в RC-цепях, так и в схемах установки начального состояния микроконтроллеров. Отсюда можно сделать вывод, что все конденсаторы должны быть подвержены контролю. Обычно, в системе электроснабжения ВС электролитические конденсаторы используются в схемах фильтрации источников питания (рис. 1.11). Наибольшее распространение в электронной промышленности получили именно алюминиевые электролитические конденсаторы из-за больших значений емкости и относительно небольшого размера.

Технический метод проверки конденсатора: электрические параметрические измерения для выявления возможных несоответствий и отклонений по сравнению с исходной документацией.

Список литературы

1. Авиационные ЭВМ. Цифровые вычислительные средства в составе бортового оборудования самолетов. [Электронный ресурс] URL: https://www.itshop.ru/Aviatsionnye-M/l9i26503?ysclid=lp9tgb5417357014827 (дата обращения 10.11.23).

2. Байцер Б. Архитектура вычислительных комплексов. М.: Мир, 2011. 500 с.

3. Бетин А.В., Бондарева Н.В., Кобрин В.Н., Лобов С.А., Нечипорук Н.В. Функциональные системы аэрокосмической техники: учеб. пособие. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. 112 с.

4. Ефанов В.Н., Токарев В.П. Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2010. 783 с.

5. Михайлов О. И., Козлов И. М., Гергель Ф. С. Авиационные приборы: учебное пособие, 1977. 477 с.

Пястолов Алексей Павлович, студент, 13pyastolov05@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский университет гражданской авиации имени А. А. Новикова,

Сагитов Дамир Ильдарович, канд. техн. наук, доцент, Sagdam@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский университет гражданской авиации имени А. А. Новикова

ANALYSIS OF AIRCRAFT EQUIPMENT CONTROL SYSTEMS

A.P. Pyastolov, D.I. Sagitov

Various classifications of the study of the operability of aircraft electrical systems are considered, an introduction to the device of elements of avionics using circuits is described, local load control centres on the aircraft are presented.

Key words: aviation industry, aviation equipment systems, aircraft power supply system, power module systems.

Pyastolov Alexey Pavlovich, student, 13pyastolov05@mail.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg University of Civil Aviation named after A.A. Novikov,

Sagitov Damir Ildarovich, candidate of technical sciences, docent, Sagdam@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg University of Civil Aviation named after A. A. Novikov

УДК 621.914.025.7
DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-703-704

СХЕМА ПРОГРЕССИВНОГО РЕЗАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Е.В. Артамонов, О.И. Борискин, В.В. Киреев, В.А. Зырянов, Д.В. Васильев

Внедрение имитационного моделирования в кинематику процесса зубофрезерования дает возможность повысить точность производства зубчатых колес и представляет важность при разработке червячных фрез. Параметры срезаемых слоев – ключ к прогнозированию напряженно-деформированного состояния зуба фрезы. Обычно для моделирования процесса обработки используются методы на основе упрощенных схем резания. Метод моделирования зубофрезерования, рассмотренный в статье, выделяется эффективностью, так как алгоритм формирования поверхностей и моделирование сечений стружки зависят от кинематики процесса. Изменение интенсивности деформации материала вызывает нестационарность процесса и образование стружки разных сечений. Для уменьшения этого эффекта предложено применять схему резания с переменным исходным контуром.

Ключевые слова: зубофрезерование, моделирование процесса резания, твердый сплав.

Зубофрезерование представляет собой широко применяемый метод обработки, позволяющий создавать зубчатые колеса разнообразных модулей и размеров. Эта технология постоянно находится в фокусе научных исследований благодаря своей универсальности и надежности. Систематический анализ динамики формирования срезаемых слоев служит фундаментом для глубокого изучения процесса зубофрезерования. Точность геометрического моделирования и методы количественной оценки обрабатываемых поверхностей определяют корректность принимаемых решений относительно конструкции фрез, оптимизации параметров резания, уменьшения износа инструмента, увеличения эффективности обработки и качества конечных зубчатых колес, а также снижения сил резания,

динамических нагрузок, колебаний и вибраций. Попытка имитировать процесс формования зубчатых колес оказывается более сложной по сравнению с другими процессами формообразования. Это происходит из-за сложной кинематики и создания зазоров между зубьями. Безупречная методология точного и качественного измерения объемных и количественных параметров стружки все еще не разработана из-за сложной кинематики процесса, которую трудно смоделировать. Углубленный обзор предыдущих исследований показывает, что большинство из них были направлены на решение этой проблемы с использованием различных методов [1–6].

В основе этих стратегий лежит задача вычерчивания режущих кромок с использованием пространственно ориентированных траекторий и площадей поперечного сечения срезаемого слоя. Изучение формы поперечного сечения может раскрыть форму срезаемых слоев в процессе резания и их геометрические параметры. Увеличение режущей способности материала инструмента требует перехода от быстрорежущих инструментов к инструментам со сменными гранями из твердого сплава. Спектр его применения расширяется, поскольку наиболее разумная тактика согласуется с преодолением препятствий, связанных с использованием нетрадиционной схемы резания. В основе разработанного подхода к графическому моделированию зубофрезерования лежит пространственное сочленение всех режущих кромок, задействованных в инструменте. Общепризнано, что стружка сохраняет недеформированную форму. Основными характеристиками операции зубофрезерования являются четыре основных одновременных кинематических действия: вращение фрезы, осевое смещение инструмента, вращение заготовки зубчатого колеса и вращение каждого из режущих зубьев инструмента вокруг своей собственной оси [7-12].

Основная проблема при моделировании заключается в том, что граница режущих поверхностей продолжает изменять свой контур, местоположение и морфологию в соответствии с ориентацией зубьев фрезерного инструмента. Эта изменяющаяся граница появляется на заготовке, служа переходом между ее необработанной поверхностью и полуобработанной впадиной зуба. При обработке впадины зуба задействован каждый режущий элемент, за исключением тех, которые выполняли режущие действия до текущего момента обработки. Это включает в себя зубья, активно взаимодействующие между обрабатываемой деталью и червячной фрезой. Соответственно, внешний вид и площадь срезаемых слоев постоянно корректируются в процессе механической обработки, как показано на рисунках 1, 2.

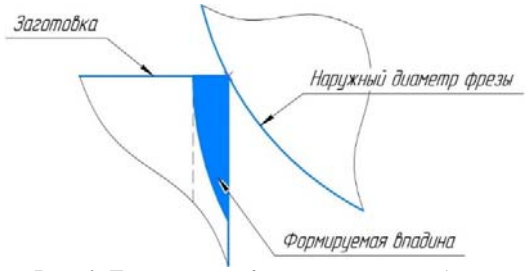


Рис. 1. Траектория формирования впадины

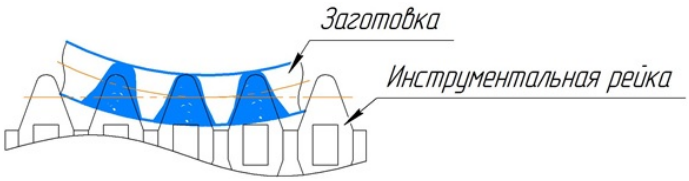


Рис. 2. Моделирование формирования впадины

Основой методики является:

1. Фрагмент металла, вырезанный каждым зубом инструмента, о чем свидетельствует размер поперечного сечения стружки, заключен между следующим: режущей поверхностью, идентичной для каждого зуба, концептуально разработанной на основе базовой конструкции инструментальной рейки; и периферией цилиндрической поверхности зубчатого колеса, которая колеблется с положением червячной фрезы. Каждая фреза, характеризуемая своим модулем, количеством зубьев, углом подъема по винтовой линии, ориентацией фрезы, внешней окружностью и величиной подачи, обладает идентичными геометрическими характеристиками на границах резания. Виды этих границ основаны на контуре зубьев формующего инструмента и создается в процессе фрезерования вокруг главной оси фрезы. Траектория, по которой движется режущая кромка, фиксируется в виде сплайна, и с помощью современных инструментов САПР она может быть представлена как аналитическим, так и визуальным способом путем наложения каждой границы на цилиндрический корпус основного материала.

2. Распознавание траекторий вращения режущих зубьев, которые ранее обрабатывали впадину, необходимо для идентификации срезаемых слоев. Это пространство ограничено режущей поверхностью зубьев червячной фрезы и границами результирующих поперечные сечения. Каждый зуб совершает режущее движение в уникальном направлении относительно центральной оси фрезы и зубчатого колеса с выровненным вращением инструмента. Внешние и внутренние края нарезанного слоя остаются неизменными во время процесса резания. Однако фазы входа и выхода инструмента являются исключениями из приведенного выше шаблона моделирования. Смещение границ срезаемого слоя происходит после каждого поворота режущего зуба инструмента. Как упоминалось ранее, формообразование осуществляется всеми режущими зубьями архимедова червяка во время вращения зубчатого колеса, которое установлено на делительном столе зубофрезерного станка. Размеры и форма слоев, срезаемых зубьями фрезы, постоянно меняются.

При анализе геометрических данных срезаемых слоев фрезой можно идентифицировать основные параметры, включая область сечения и изменяемые размеры контакта режущих зубьев. Приведены примеры наибольших площадей сечения для фрез, соответствующих ГОСТ и применяющих прогрессивным методом резания. Благодаря

внедрению имитационного моделирования становится возможным определять жизненно важные параметры срезаемого слоя, такие как площадь поперечного сечения, переменная длина и ширина контакта между режущими зубьями, путем анализа геометрических параметров срезаемых слоев, удаляемых всеми зубьями фрезы. Сечения, описывающие максимальную площадь поперечного сечения, визуализируются для фрез с профилями, соответствующими ГОСТу, и профилей, работающих по прогрессивной схеме резания показаны на рисунках 3 и 4.

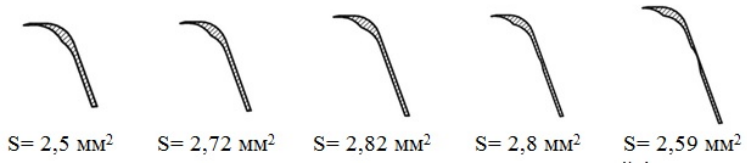


Рис. 3. Фрагменты для стандартной фрезы

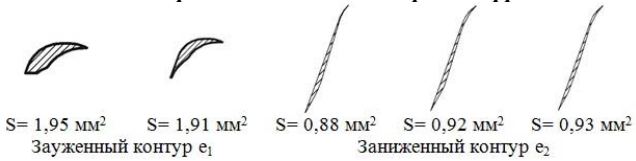


Рис. 4. Фрагменты прогрессивной схемы резания

Нестабильность интенсивности пластической деформации в материале заготовки, вызванная колебаниями толщины стружки, служит фактором, определяющим нестационарность процесса фрезерования. Этот параметр зависит от положения инструмента в каждой точке процесса резания и изменения длины и ширины стружки во время фрезерования. Использование этой модели для анализа процесса резания позволяет оценивать изменения толщины стружки в соответствии с изменениями глубины резания фрезы и силы резания.

Методика моделирования и анализа поверхностей между зубьями шестерни и пространственных траекторий зубьев фрезы, учитывающая сечение этих поверхностей, изменяющееся в процессе фрезерования, соответствует форме и размерам неискаженной стружки, удаляемой всеми активными зубьями фрезы. Площадь стружки выступает в качестве основного параметра, характеризующего интенсивность пластической деформации в процессе резания. Влияние начального контура режущей кромки инструмента на распределение главных напряжений в сменной твердосплавной пластине приводит к наибольшему разрушению и износу задней поверхности, в первую очередь на вершине режущей кромки.

Список литературы

1.Семенченко И.И. Проектирование металлорежущих инструментов / И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров. Москва: Машиностроение. 1963. 952 с.

2.Борискин О.И. Эвольвентная червячная фреза с твердосплавными рейками / О. И. Борискин, Н. Г. Стаханов, А. В. Якушенков // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении : всероссийская научно-техническая конференция. Тула, 2019. С. 116-118.

3.Чулин И.В. Повышение стойкости сборных твердосплавных фрез для обработки железнодорожных остряков : 05.02.07 : автореф дис. … канд. техн. наук. Москва, 2011. 24 с.

4.Исаев А.В. Разработка сборных фрез со сменными многогранными твердосплавными пластинами, расположенными на винтовой поверхности, для обработки заготовок с фасонным профилем : 05.02.07 : автореф дис. … канд. техн. наук. Москва, 2012. 24 с.

5.Гречишников В.А. Метод формирования профиля образующей исходной инструментальной поверхности сборных фасонных фрез с режущими пластинами, расположенными вдоль винтовой линии / В. А. Гречишников, А. В. Исаев, В. Б. Романов // Вестник МГТУ Станкин. 2015. №1. С. 8-12.

6.Чевычелов С.А. Повышение эффективности проектирования гиперболических фрез компьютерным моделированием процесса репрофилирования рельсов : 05.02.07 : автореф дис. … канд. техн. наук. Орел, 2005. 23 с.

7.Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. Тюмень: ТюмГНГУ. 2003. 192 с.

8.Смирнов Н.Н. Зубофрезерование многозаходными червячными фрезами с различными схемами резания : 05.03.01 : автореф дис. … канд. техн. наук. Волгоград, 1982. 20 с.

9.Ничков А.Г. Влияние схемы резания при зубофрезеровании на износ зубьев червячной фрезы / А. Г. Ничков, Б. К. Шунаев // II Научно техническая конференция УПИ : тезисы докладов конференции. Свердловск, 1968. С. 54-60.

10. Ничков А.Г. Основы комплексного исследования процесса зубофрезерования и оптимизации его конструктивных и технологических параметров в простых и комбинированных схемах нарезания зубчатых колес червячными фрезами : 05.03.01 : дис. … докт. техн. наук. Тула, 1991. 566 с.

11. Ничков А.Г. Стойкость червячной фрезы в зависимости от схемы резания // Передовой научно-производственный опыт резания металлов: тезисы докладов конференции. Свердловск, 1971. С. 29-33.

12. Медведицков С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. Москва: Машиностроение. 1981. 106 с.

Артамонов Евгений Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заведующей кафедрой, artamonovev@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Борискин Олег Игоревич д-р техн. наук, профессор, директор политехнического института, imstulgu@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Киреев Виталий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, kireevvv@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Зырянов Виталий Андреевич, канд. техн. наук, доцент, zyrjanovva@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,

Васильев Дмитрий Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, vasilevdv@tyuiu.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет

THE SCHEME OF GROUP CUTTING IN THE PROCESS OF PROCESSING LARGE-MODULE GEARS

E.V. Artamonov. O.I. Boriskin, V.V. Kireev, V.A. Zyryanov, D.V. Vasiliev

The introduction of simulation modeling into the kinematics of the gear milling process makes it possible to increase the accuracy of the production of gears and is important in the development of worm cutters. The parameters of the cut layers are the key to predicting the stress–strain state of the milling cutter tooth. Usually, methods based on simplified cutting schemes are used to simulate the processing process. The method of modeling gear milling, considered in the article, is distinguished by efficiency, since the algorithm for forming surfaces and modeling chip sections depend on the kinematics of the process. The change in the intensity of the deformation of the material causes the unsteadiness of the process and the formation of chips of different sections. To reduce this effect, it is proposed to use a cutting scheme with a variable initial contour.

Key words: gear milling, modeling of the cutting process, hard alloy.

Artamonov Evgeny Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, artamonovev@tyuiu.ru, Russia. Tyumen. Industrial University of Tyumen,

Boriskin Oleg Igorevich, doctor of technical sciences, professor, director of the polytechnic institute, imstulgu@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Kireev Vitaly Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, kireevvv@tyuiu.ru, Russia. Tyumen. Industrial University of Tyumen,

Zyryanov Vitaly Andreevich, candidate of technical sciences, docent, zyrjanovva@tyuiu.ru, Russia. Tyumen. Industrial University of Tyumen,

Vasiliev Dmitry Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, vasilevdv@tyuiu.ru, Russia. Tyumen. Industrial University of Tyumen

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Стародубцев Ю.И., Иванов Н.А., Самохин В.Ф., Митрофанов М.В., Вершенник А.В.
Применение телекоммуникационной инфраструктуры оптических кабелей для определения местоположения подвижных объектов в судоходных акваториях 3

Сухов А.М., Крупенин А.В., Ленц Е.А., Праслов Д.Д.
Обоснование необходимости проведения исследований системы обеспечения информационной безопасности 8

Сухов А.М.
Классификация показателей результативности проводимой системой обеспечения информационной безопасности операции 11

Середин О.С., Ляхов Д.В., Ломов Н.А.
Применение нейронных сетей к решению задачи поиска отражательной симметрии для бинарных растровых изображений 15

Жулай В.А., Тарасов Е.А., Тарасова Е.В., Ульянов А.В.
Обзор методов реконструкции ДТП и их ограничений с точки зрения национальной правовой базы 22

Щирый А.О.
Создание датасета по эмпирическим моделям многолучевого распространения декаметровых радиоволн в ионосфере 25

Панамарев Г.Е., Ефремов А.В.
Применение аппаратно-программной платформы «ЭЛЬБРУС» для быстрого обнаружения скрытых ошибок 31

Пинчуков В.В., Парамонов А.А.
Имитационное моделирование трехантенного фазового пеленгатора 37

Гусеница Я.Н., Гречкина О.В.
Модель компетентности эксперта 44

Кочубей Р.И., Бычковский М.М., Зайкин Н.Н., Фатьянова Е.В., Свидло А.В., Чуприков О.В.
Оценка вероятности ошибки в каналах радиосвязи с постоянными параметрами 50

Акименко Т.А., Ларкин Е.В., Фам Т.Л.
Модель гидравлической трансмиссии 54

Назаров Н.Б., Набродова И.Н.
Методы обработки изображений 59

Воробьев А.А., Антошкин А.А.
Подход к геоэкологическому мониторингу окружающей среды с использованием данных из открытых источников 61

Таранов А.Ю., Остроухов А.Ю.
Повышение энергоэффективности в решении площадных задач роем автономных роботов за счет релейной связи 65

Добрышин М.М., Горшков А.А., Струев А.А., Кирикова Ю.А.
Факторы, влияющие на возникновение уязвимостей информационной безопасности корпоративной сети связи 71

Есиков О.В., Данилов А.В., Земляницын М.С.
Комплексное применение многоагентных алгоритмов для решения задачи построения маршрута движения летательного аппарата с учетом рельефа местности 75

Зайчиков И.В.
Анализ возможностей проведения автоматизированного размерного контроля видимых дефектов печатных плат 78

Курбатский С.А., Хомяков Д.А., Ростовцев И.А.
Статистические характеристики углового шума в моноимпульсном пеленгаторе 81

Балабаев О.С., Прохорцов А.В.
Способ начальной выставки бинс высокоманёвренного летательного аппарата по параметрам ориентации на подвижном основании ……. 84

Балабаев О.С., Прохорцов А.В.
Оценка точности способа начальной выставки БИНС высокоманёвренного летательного аппарата по параметрам ориентации на подвижном основании …….. 87

Волков П.В.
Особенности численного моделирования аэродинамического нагрева тела высокоскоростным потоком воздуха …… 89

Головин К.А., Копылов А.Б., Свандлунова А.Г.
Ревитализация городского пространства …… 94

Головин К.А., Копылов А.Б., Трофимова Ю.С.
Актуальность экологичности в архитектуре …….. 97

Акименко Т.А., Фам Т.Л.
Модель процесса бурения установки СБШ-250МН-32Т ……... 100

Белов А.С., Добрышин М.М., Горшков А.А., Большебратский К.М.
Методика формирования поверхности защиты для оценки защищенности элементов корпоративной сети связи ……... 102

Воробьев А.А., Андросов А.Ю., Черный Д.К., Беляев Д.А.
Подход к мониторингу электоральных настроений и формированию социального портрета кандидата в ходе избирательной кампании с использованием данных из открытых источников …….. 106

Добрышин М.М., Шугуров Д.Е., Слесарева К.М., Юркин Д.А.
Методика сокращения признакового пространства систем обнаружения атак на основе применения генетического алгоритма …….. 110

Ефимов А.И., Муратов Е.Р., Никифоров М.Б.
Автоматизированная система исследования алгоритмов обработки изображений ……... 113

Любимов В.А., Лазарев С.Н.
Оценка готовности эксплуатации беспилотных авиационных систем …… 118

Хамитов Р.Н., Хмара Г.А., Махмутова В.Р.
Алгоритм выбора мест размещения накопителей энергии для системы электроснабжения нефтегазодобывающих месторождений ……. 121

Назаров Н.Б., Набродова И.Н.
Методика улучшения качества изображения на основе анализа информации с фотокамеры …….. 126

Румянцев В.Л., Смыляев Д.В., Карпов А.Н.
Математическая модель возмущающих воздействий на движущуюся цель со стороны микропрофиля местности ……... 130

Ходжаев И.А., Соловьев А.М., Гудиков А.Л.
Выбор параметров для прогнозирования технического состояния цифровых систем передачи …….. 134

Кочетков В.А., Черкасов А.Е., Солдатиков И.В.
Математическая модель пространственно-временного сигнала, формируемого антенной решеткой с диаграммообразующей схемой ……. 138

Майоров Е.Е., Арефьев А.В., Гулиев Р.Б., Пушкина В.П., Цыганкова Г.А.
Метод контроля, анализирующий расходимость в исследовании взаимодействия внешних агентов с биологическими объектами ……... 144

Подкопаев И.А., Подкопаев А.В., Должиков В.И.
Применение поправочных формул внутренней баллистики при расчете параметров управления газообразованием артиллерийского выстрела …… 148

Минаков Е.П., Александров М.А., Мищеряков А.В.
Модель расчета вероятности потенциально результативных пролетов космического аппарата над районом возникновения чрезвычайной ситуации природного или техногенного характера ……. 152

Кивчун О.Р., Морозов Д.Г.
Методика режимного нормирования электропотребления объектов регионального электротехнического комплекса в условиях ресурсных ограничений …….. 157

Ураскин Е.А., Хаймович И.Н.
Организация технологической подготовки производства на основе PDM-системы SMARTEAM …….. 164

Скрябин В.С., Бурлаков А.А., Комаров Е.В., Питенко В.А., Муравьев А.И.
Расчет показателей эффективности информационной поддержки процессов планирования и системы информационной поддержки ……... 168

Галанкин А.В., Чащин С.В., Сизов Д.Н.
Разработка схемы графического представления модели передвижения подвижных средств в элементах инструментария моделирования …….. 171

Закутаев А.А., Емельянов А.В., Качалин А.А., Барякшев С.В.
Исследование подходов к оцениванию коэффициента оперативной готовности радиотехнического средства в составе распределенной группировки …….. 175

Сидельников И.Д.
Организация корпоративного хранилища данных в замкнутом контуре производства, эксплуатации и рециклинга …….. 179

Сназин А.А., Шевченко В.И.
Численное моделирование распространения ударных волн в кольцевых каналах различного сечения …….. 182

Жбанова В.Л., Гафуров В.Р.
Расчет хроматической адаптации методом Фон Криса ……. 186

Майоров Е.Е., Курлов В.В., Бородянский Ю.М., Дагаев А.В., Таюрская И.С.
Интерферометрия, как высокоточный инструмент для контроля оптических элементов прецизионной оптики ……. 192

Подкопаев И.А., Подкопаев А.В., Должиков В.И.
Декомпозиционная математическая модель малокалиберного артиллерийского выстрела ……. 196

Крючкова Т.Н., Ефимов А.И.
Совмещение трехмерных облаков точек. итеративный алгоритм ближайших точек …… 203

Мешалкин В.А., Игнатьев В.М.
Синтез широкополосного базового излучателя с комбинированными нагрузками методом конечных разностей …… 210

Цехош С.И., Журавский Б.В.
Применение модернистских компьютерных технологий при обучении курсантов автошколы ……... 213

Лучко А.А., Фадеев Р.В., Повчун И.О., Шкилев Н.В., Новиков П.А., Диченко С.А., Самойленко Д.В.
Исследование объема вводимой избыточности для обеспечения целостности данных на основе преобразований в комплексной плоскости ……. 218

Репьев И.Н., Сысойкин А.И., Репьева Д.И.
Последовательность подготовки IT-специалистов для участия в конкурсе «уверенный приём» в рамках армейских международных игр ……... 224

Горшенин А.Ю., Грицай А.С., Денисова Л.А.
Применение машинного обучения деревьев решений для краткосрочного прогнозирования электропотребления …….. 226

Ладышкин Г.С., Федоренко А.В.
Рекомендации по инженерной подготовке территории с многолетнемерзлыми грунтами ……... 231

Филаретов Г.Ф., Цинь Юйдэ
Алгоритм оперативного обнаружения момента изменения математического ожидания процесса авторегрессии 1-го порядка …….. 237

Иваню А.Ю.
Алгоритм оценивания достоверности выходных значений структурно-стохастической вычислительной модели ……. 242

Привалов А.Е., Смирнов А.В., Токарев М.С.
Концепция управления многоспутниковыми системами с применением цифровых двойников ……. 245

Попов А.М.
Алгоритм автоматизированной верификации структурно-функциональной модели обработки телеметрической информации на основе вычислительной сети Петри ……... 251

Веревкин С.А., Трофимова Н.А.
Анализ методов и подходов формирования признакового пространства для разработки модели выявления атакующих воздействий на основе GNN-сетей 257

Квасов М.Н., Митряев Г.А., Прохоров М.А.
Разработка математической модели семантического анализа и синтеза данных ……... 262

Трифонов И.Н., Копылов А.В.
Автоматическая транскрипция мелодики речи с использованием музыкальной нотации на основе модели восприятия человеком высоты звука ……. 267

Гейс Э.А., Морозов О.О., Козырь А.В.
Синхронизация движения агентов для формирования геометрических структур в случае квазитеплового движения …… 271

Панков И.А.
Выявление дефектов при тестировании алгоритмов цифровых устройств на базе ПЛИС ……... 277

Удальцов Н.П., Агеев П.А., Михейкина Е.В.
Особенности построения ситуационных тренажеров …… 281

Воскобойникова О.Б., Суханов А.В., Мамонова Т.Е., Ганина О.А.
Технология компьютерного зрения в оценке свежести пастеризованного молока …… 284

Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б.
Сравнение особенностей адаптивного метода интерполяции и метода Киммеля для двухслойных матричных фотоприемников …… 288

Кивчун О.Р.
Метод подготовки и принятия решений при управлении электропотреблением регионального электротехнического комплекса на основе обработки негауссовых данных …….. 297

Носков С.И., Кириллова Т.К., Чекалова А.Р.
Усеченный метод антиробастного оценивания в регрессионном анализе …….. 304

Климова Т.Ю., Хаймович И.Н.
Цифровизация конструкторской технологической подготовки производства на базе «RATIONAL ROSE» ……..... 306

Черкасов К.Ю., Хаймович И.Н.
Разработка информационных систем в конструкторско-технологической подготовке производства ……. 310

Данилюк Б.А., Смирнов А.В., Токарев М.С.
Анализ алгоритмов взаимодействия робототехнических комплексов и человека ……. 314

Удальцов Н.П., Агеев П.А., Михейкина Е.В.
Процедуры применения ситуационных тренажеров ……. 317

Савенков П.А., Ивутин А.Н.
Исследование метрик сходства и методов для идентификации изменений в сценариях использования мобильных устройств пользователей по их наборам текстовых данных …… 321

Лукашев А.В., Шабуня В.В., Сарафанников В.С., Билан В.В., Иванов Д.А.
Тенденции повышения уязвимости современных информационных систем со стороны квантовых компьютеров …….. 324

Коростин А.С.
Анализ использования подъемно-транспортных машин в строительной области ……. 331

Савенков П.А., Ивутин А.Н.
Исследование методов анализа эмоционального окраса пользовательских текстов ……. 333

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Лобов В.А., Фролова Е.О.
Изготовление металлических элементов выстрелов из сплава АМГ5 ……. 336

Романов П.В., Харченко А.В.
Моделирование процесса объемной штамповки поковки детали «Палец шаровой» ……. 340

Пасынков А.А., Бессмертная Ю.В.
Высадка пустотелых титановых оболочек …….. 344

Каркач Л.В.
Исследование процесса обратного выдавливания инструментами с разной геометрией …….. 346

Исаева Ю.Д., Харченко А.В.
Оценка интенсивностей напряжений при вытяжке прямоугольных коробок в радиальные матрицы ……. 349

Галицина К.А.
Моделирование получения сложнопрофильного изделия обработкой металлов давлением ……. 352

Гасанов А.И.
Получение оболочки методом обратного выдавливания …….. 354

Гребенщиков И.В.
Исследование получения металлического полуфабриката методов высадки ……. 356

Хрычев И.С., Харченко А.В.
Оценка сил высадки пустотелых титановых оболочек …….. 358

Каркач Л.В.
Разработка нового устройства для импульсной листовой штамповки …… 361

Ларин С.Н., Романов П.В.
Верхнеграничный расчет деформационных и силовых режимов осадки осесимметричных заготовок при сварке давлением …… 363

Тутышкин Н.Д.
Анализ напряжений и силовых параметров при формообразовании корпусных осесимметричных изделий с переменной толщиной стенок …… 367

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Авдеев Б.А.
Управление двойного активного моста в микросети постоянного тока с солнечными панелями …… 372

Маньков М.Б., Марголис Б.И.
Апробация технологического режима зарядно-десульфатирующей станции …… 376

Табаков О.В., Харитонова Т.В.
Актуальность применения цифровых защит на трансформаторных подстанциях …… 379

Табаков О.В., Харитонова Т.В.
Визуальный контроль коммутационных аппаратов на электрических подстанциях ……. 382

Шалухо А.В., Липужин И.А., Шувалова Ю.Н.
Разработка и исследование алгоритмов управления энергоустановкой на основе нескольких водородных топливных элементов …….. 386

Неподоба Д.В., Аблязимов М.Э., Бордюг А.С.
Анализ надежности работы компенсаторов в системах электропитания с нелинейными нестационарными нагрузками …….. 393

Калякулин А.Н., Анахова М.В., Лысак Е.А.
Разработка системы автоматической коррекции направления светового потока прожектора электропоезда ……. 397

Слабженникова И.М., Матафонова Е.П.
Анализ режима качаний в условиях неравенства электродвижущих сил генераторов …….. 403

Вынгра А.В.
Исследование интеграции активного фильтра в цепи питания электропривода с изменяющимся моментом …… 406

Сидоров К.М., Козловский В.Н., Панюков Д.И.
К вопросу исследования влияния работы климатической установки на запас хода электромобиля ……... 410

Москаленко И.В.
Оптимизация коммутации электрических цепей для определения технического состояния электрических кабельных систем …….. 413

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Силкин С.А., Кусманов С.А., Перков А.С., Алтухова О.Л.
Повышение износостойкости поверхности стали 20 электролитно-плазменным упрочнением и электроосаждением упрочняющих Co-W покрытий …….. 416

Купцов В.Р., Лядник С.В., Исаев А.В.
Математическая модель зажимного устройства токарного станка на базе пропорционального регулятора давления …….. 421

Чечуга А.О.
Особенности оборудования применяемого при шевинговании зубчатых колёс …… 425

Набоков А.Е.
Исследование вибрации при выполнении технологического процесса обработки заготовок на резьбобрабатывающих и шлицефрезерных станках машиностроительных производств …… 427

Волгин В.М., Потапов А.А., Калиш П.Э., Малахо А.П.
Физико-механические свойства уплотнительных материалов ……. 430

Шкаликов Е.А., Макашин Д.С., Коржова О.П.
Сравнение непрерывного обкатного шлифование червячным кругом и прерывистого профильного двухстороннего шлифования коническим кругом ……. 437

Чечуга А.О.
Исследование процесса обработки зубчатых колёс методом шевингования …….. 440

Литвинов А.Е., Сизо А.А., Чукарин А.Н.
Разработка оборудования для повышения стойкости режущего инструмента, улучшения точности и качества процесса резания, снижения шума и вибрации при работе ленточнопильных станков ……. 443

Говоров И.С., Потапов А.А., Веневцев А.Ю.
Исследование физико-механических свойств образцов после FDM- печати ……. 446

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Матыцина И.А., Коробова Л.А.
Методология отбора сотрудника на основе нечеткой логики …….. 451

Хачкинаян А.Е.
Исследование надежности деталей кривошипно-шатунного механизма двигателей транспортно-технологических машин ……... 456

Никольский С.М.
Рекомендации по контролю допусков формы и расположения на КИМ …… 461

Антонова Н.А., Козловский В.Н., Клентак А.С., Козловский Н.В.
Отечественный опыт организации и обеспечения кодификации и мониторинга дефектов автомобилей в эксплуатации ……... 464

Васильев М.М., Козловский В.Н., Айдаров Д.В.
Оценка факторов узнаваемости и потребительского качества при использовании различных видов и марок электроинструментов …….. 473

Новиков В.В., Литвинов А.Е., Чукарин А.Н., Ксандопуло С.Ю.
Разработка комплексной системы управления охраной труда на машиностроительных предприятиях в условиях заготовительного производства …… 476

Кондратова А.И.
Процесс постоянного улучшения на производстве ……... 482

Васильев М.М., Козловский В.Н., Айдаров Д.В.
Оценка основных принципов поведения потребителей при выборе электроинструментов в процессе покупки ……... 484

Никольский С.М.
Эффективное выполнение контактных измерений на КИМ ……. 489

Хачкинаян А.Е.
Исследование качества упрочнённого наплавленного металла ……... 491

Чуракова Е.Ю.
Аудит, как инструмент контроля качества предприятия …….. 497

Бром А.Е., Швайко Б.А.
К вопросу об организации оперативного контроля качества продукции общего машиностроения …… 499

Борискин О.И., Ларин С.Н., Нуждин М.Г.
Качество металла при обработке давлением …….. 503

Гафаров Р.Р., Козловский В.Н., Клентак А.С.
Результаты реализации экспертной методики потребительской оценки качества новых автомобилей с учетом конкурентного рынка …… 505

Гафаров Р.Р., Козловский В.Н., Клентак А.С.
Результаты реализации экспертной методики потребительской оценки качества при оценке новых автомобилей собственного производства ……... 510

Антонова Н.А., Козловский В.Н., Клентак А.С.
Обзор передового опыта при решении задачи кодификации дефектов автомобилей в эксплуатации …… 515

Никольский С.М.
Измерение типовых геометрических элементов на КИМ ……. 521

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Воронин С.С., Касаркин К.С., Третьякова В.А.
Разработка принципов формирования нормативной базы для оценки трудоемкости НИОКР ……. 524

Чугунов М.В., Полунина И.Н., Ермишов И.А.
Интегрированные модели транспортной платформы мобильного робота …….. 528

Майстро А.С., Глуханов А.С., Сидоренко Д.Д.
Система управления надводными беспилотными платформами ……. 534

Горяинов Р.И., Левко И.В., Жарких М.С.
Методика оценивания затрат на поддержание заданного уровня технического состояния автоматизированных систем специального назначения …… 537

Аблязимов М.Э., Иващенко А.В., Бордюг А.С.
Эмуляторы ARMABIS с адаптивными свойствами автоматического управления ……. 543

Анцев А.В., Сальников В.В., Сальников С.В., Янов Е.С.
Информационно-измерительная и управляющая система процессами резания в условиях их вариабельности ……. 547

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И КОМПЛЕКСЫ

Журавский Б.В., Цехош С.И.
Эффективность работы системы курсовой стабилизации автомобиля в различных дорожных условиях ….. 554

Жулай В.А., Тарасов Е.А., Тарасова Е.В.
Существенные моменты анализа дорожно-транспортных происшествий с участием интеллектуальных транспортных средств ……..... 561

Репьев И.Н., Багреев Р.В., Сысойкин А.И., Ашлапов М.В., Репьева Д.И., Тевс О.П., Попов Р.А., Фроловский О.В.
Подготовка экипажей командно-штабных машин для участия в этапе «Военизированная эстафета» конкурса «Уверенный приём» в рамках армейских международных игр ……... 564

МАШИНОВЕДЕНИЕ

Крюков В.А., Тюменев Д.А.
Анализ испытательных стендов для электроприводов трубопроводной арматуры ……... 567

Крюков В.А., Плясов А.В.
Кинематический анализ многодвигательного дифференциального привода ……. 573

Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Бакулин К.А., Синицин Н.Г.
Перспективы повышения производительности поршневых компрессоров …… 579

Фаизов М.Р., Хабибуллин Ф.Ф., Романов И.А.
Исследование геометрических параметров шестизвенного механизма на основе двух пространственных механизмов имеющие структура параллелепипеда ……... 581

Яицков И.А., Поляков П.А., Шевцов Ю.Д., Федотов Е.С.
Предпосылки создания адаптивной системы торможения транспортных средств …… 585

Бохонский А.И., Варминская Н.И., Майстришин М.М.
Снижение энергетического принуждения для достижения цели оптимального движения …….. 593

Витчук П.В., Сысенко Н.Г., Витчук Н.А., Анцев В.Ю., Шафорост А.Н., Горынин А.Д.
Обеспечение постоянства скорости горизонтального перемещения груза при изменении вылета стрелы крана стрелового типа ……... 597

Романов И.А., Фаизов М.Р., Хабибуллин Ф.Ф.
Исследование геометрических параметров шестизвенного механизма путем объединения пространственных механизмов, сферической и параллелепипедной структуры ……... 601

Савенков Н.В., Покинтелица Е.А., Моржухин А.М.
Проблемы и направления развития систем терморегуляции в электробусах ……. 605

Бусаров С.С., Бусаров И.С., Бакулин К.А., Синицин Н.Г.
Методика расчёта суммарной поршневой силы для тихоходных агрегатов ……... 609

Федоринин Н.И.
Динамическая модель кулачкового коромыслового механизма …….. 612

Фаизов М.Р., Хабибуллин Ф.Ф., Хабибуллина Л.Ф.
Исследование момента инерции 5R механизма сферической структуры с двумя степенями свободы ……... 619

МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Бикбулатова Г.И., Галеев А.С., Болтнева Ю.А., Ларин П.А., Гилязова С.Р.
Повышение энергоэффективности насосных станций системы ППД ……. 624

Лозовая С.Ю., Бащева Е.С.
Сравнительный анализ эффективности разделения частиц пиритных огарков в гидроциклонах напорного типа …….. 627

Пантюхина Е.В., Пантюхин О.В., Комаров Д.В.
Обоснование рациональных параметров процесса и оборудования для производства полимерных упаковочных материалов …….. 632

Федорова Л.А., Софьин А.П., Кукушкин И.О., Молодова Ю.И.
Устройства маятникового типа для ступенчатого регулирования подачи сыпучих и газонаполненных тел …… 637

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т., Фасхутдинов А.И.
Характеристики точности и шероховатости поверхностей зубьев зубчатых венцов при формообразовании стандартизованными дисковыми фрезами на станках с ЧПУ …….. 642

Абдульманова К.И., Финоченко В.А., Чукарин А.Н.
Теоретическое исследование вибрации и шума коробок скоростей токарных деревообрабатывающих станков с двухсторонними электродвигателями …… 647

Редников С.Н., Трушин Н.Н., Сычев Д.В.
Полимеризация нефтяной жидкости в зазорах плунжерных и золотниковых пар ……. 652

Вартанов М.В., Коган Е.А., Нгуен Ван Линь, Дао Ван Луу
Диаграмма заклинивания нежестких цилиндрических деталей при роботизированной сборке на основе применения позиционно силового управления …….. 656

Жилин Р.А., Струнки П.В., Никитин С.А.
Новые возможности в изготовлении режущего инструмента …….. 664

Устинов И.К., Иванов Ю.В., Устинов Е.И., Вяткин А.А., Калгина Ю.С.
Обзор методов крепления режущих твердосплавных пластин ……. 667

Лянгузов Д.А.
Постановка задачи структурно-параметрического синтеза низкопрофильной антенны ……... 670

Артамонов Е.В., Борискин О.И., Киреев В.В., Зырянов В.А., Васильев Д.В.
Повышение прочности червячных зубофрезерных инструментов за счет групповой схемы резания ……. 673

Винник П.М., Винник Т.В., Еськова Е.А.
Построение математической функции преобразования характеристик в ходе технологической операции ... 676

Житный М.В., Мартынов В.В., Синельников Э.Г., Шуневич Н.А.
Направление модернизации легкогазовой установки …… 680

Александров И.А., Муранов А.Н., Татарканов А.А., Шептунов С.А.
Контроль качества механической обработки деталей при установке в центрах …… 683

Кондратова В.М., Петров П.А., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А., Шмакова Н.С.
Особенности электропроводности изделий, изготовленных с помощью 3D-печати методом FFF из саженаполненной полимерной композиции …….. 688

Чередниченко Н.И., Петров П.А., Сапрыкин Б.Ю.
Выбор режима 3D-печати формообразующего инструмента на основе анализа свойств фотополимерных материалов ……. 693

Пястолов А.П., Сагитов Д.И.
Анализ систем контроля авиационного оборудования …….. 697

Артамонов Е.В., Борискин О.И., Киреев В.В., Зырянов В.А., Васильев Д.В.
Схема прогрессивного резания в процессе обработки крупномодульных зубчатых передач …….. 703

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ

ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО У НИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 11

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 27.11.23. Дата выхода в свет 30.11.23
Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная
Усл.-печ. л. 116,35
Тираж 500 экз. Заказ
Цена свободная

Адрес редакции и издателя:
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95